



**Ana Isabel Mourão
Monteiro**

**Caracterização e otimização do polimento de grés
porcelânico**



**Ana Isabel Mourão
Monteiro**

Caracterização e otimização do polimento de grés porcelânico

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Paula Vilarinho do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo incansável apoio e motivação

o júri

Presidente

Professora Doutora Maria Margarida Tavares Lopes de Almeida
Professora auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro (arguente)
Professor adjunto do Instituto Politécnico de Viana do Castelo

Professora Doutora Paula Maria Lousada Silveirinha Vilarinho (orientadora)
Professora associada da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Professora Doutora Paula Vilarinho pelo incentivo, disponibilidade e apoio.

À empresa Revigrés, em especial ao Eng.º Jorge Girão, pela oportunidade para a realização do estágio e pela disponibilização de todo o equipamento e material necessário.

Aos funcionários do laboratório da empresa Revigrés pela ajuda e disponibilidade.

Aos funcionários da secção do polimento, em especial ao Sr. José Penetra, ao Sr. Paulo Almeida e ao Ricardo Moreira pelos conhecimentos transmitidos, pela ajuda e disponibilidade.

Aos técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, da Universidade de Aveiro, pela ajuda e disponibilidade.

Ao Eduardo Silva e à Simone Rodrigues por me terem cedido o rugosímetro.

Ao Eng.º Fernando Gomes da empresa Abressa - Abrasivos de Portugal pela ajuda.

À minha família, aos meus amigos e ao meu namorado pela paciência, compreensão, carinho, motivação e apoio ao longo desta etapa.

palavras-chave

Processo de polimento, cromática superbranco, cromática ice, travertino silver.

resumo

Este trabalho teve como objetivo o estudo do processo de polimento em produtos de grés porcelânico da empresa Revigrés.

O polimento é um processo que melhora as características estéticas da superfície da peça, aproximando desta forma a sua aparência às pedras naturais.

Durante as três etapas de polimento, foi feito um estudo sistemático da caracterização estrutural, microestrutural e das propriedades dos produtos polidos, para se entender que fenómenos acontecem em cada uma destas etapas e encontrar soluções para os problemas descobertos.

A primeira etapa é a de calibração que tem como finalidade planificar a superfície. Esta danifica fortemente a superfície induzindo defeitos que são irrecuperáveis com as etapas seguintes. As seguintes etapas eliminam os riscos, tornam a superfície uniforme e conferem brilho. Os defeitos incitados provocam uma diminuição da resistência às manchas. Por forma a contornar o problema a empresa coloca uma cera impermeabilizante na superfície da peça polida.

De forma a diagnosticar o problema na qualidade da superfície polida, foi eliminada a etapa de calibração no processo de polimento das peças de grés porcelânico técnico e conclui-se que a supressão desta etapa mantém as propriedades técnicas, como a absorção de água e a porosidade aparente, mas piora os atributos estéticos.

Como soluções foi sugerido, fazer alterações no abrasivo usado de forma a não danificar tanto a superfície, ou eliminar a etapa de calibração e melhorar as restantes.

keywords

Polishing process, cromática superbranco, cromática ice, travertino silver.

abstract

The current work aims at studying the polishing process of porcelain tiles from Revigrés Company.

Polishing is a process that enhances the esthetic characteristics of the surface of the ceramic pieces, by achieving a higher resemblance to the natural stones. During the three stages of the polishing procedure, a systematic study of the ceramic pieces was followed, concerning the structural and microstructural properties of the polished products, in order to understand the effect of each stage and come up with solutions for the occurring problems.

The first stage is the calibration stage, which aims at flattening the surface. This stage highly damages the surface, inducing defects that are irrecoverable after the succeeding stages. The following steps eliminate the scratches, making the surface more uniform and confer brightness. The induced defects provoke decrease of the stain resistance. In order to resolve this problem, the company's strategy is the application of a waterproof wax on the surface of the polished piece.

In order to diagnose the problem on the quality of the polished surface, the calibration stage of the polishing process of the technical porcelain samples was omitted and it was concluded that the elimination of this stage maintains the technical properties, such as water absorption and apparent porosity, however it deteriorates the esthetical attribute.

The suggested solutions are modifications of the utilized abrasive, in order to avoid excessive damaging of the surface, or elimination of the calibration stage and enhancement of the next stages.

Índice

Índice de figuras	III
Índice de tabelas	VI
Lista de símbolos	VIII
Lista de abreviaturas	VIII
1. Introdução	1
1.1. Empresa Revigrés	1
1.2. O grés porcelânico: definições e propriedades	2
1.3. O processo de fabrico da empresa Revigrés	4
1.4. Matérias-primas, formação de fases e desenvolvimento microestrutural	7
1.5. O polimento, razão do polimento, descrição do polimento da Revigrés	12
1.6. Objetivos	22
2. Materiais e métodos	25
2.1. Material a analisar e suas características	25
2.2. Métodos	29
2.2.1. Microscópio eletrónico de varrimento (SEM)	29
2.2.2. Determinação da resistência às manchas	29
2.2.3. Determinação da absorção de água, porosidade aparente e densidade	33
2.2.4. Medição do brilho	34
2.2.5. Medição da rugosidade	35
2.2.6. Determinação do módulo de rutura	36
2.2.7. Determinação da resistência à abrasão profunda para ladrilhos não vidrados ...	37
2.2.8. Determinação da resistência à abrasão superficial para ladrilhos vidrados	40
2.2.9. Difração de Raios-X	42
3. Resultados e discussão	45
3.1. Caso de estudo 1: Cromática superbranco	46
3.2. Caso de estudo 2: Cromática ice	54
3.3. Caso de estudo 3: Travertino silver	64
3.4. Ponto da situação	73
3.5. Caso de estudo 4: Polimento da cromática superbranco sem a etapa de calibração .	75
3.6. Caso de estudo 5: Polimento da cromática ice sem a etapa de calibração	79

4. Conclusão	85
5. Sugestões	87
Referências bibliográficas	88

Índice de figuras

Figura 1. Representação esquemática do processo de fabrico do grés porcelânico.	5
Figura 2. Diagrama ternário com variações de formulação de grés porcelânico em argila-quartzo- feldspato [11].	7
Figura 3. Transformação de fases que ocorrem durante a sinterização do grés porcelânico [11].	9
Figura 4. Linha de polimento (a), uma cabeça polidora (b) e placa giratória com os abrasivos (c).	13
Figura 5. Movimento oscilatório do abrasivo o que permite que o seu consumo seja homogéneo [2].	13
Figura 6. Perfil do número de contactos dos abrasivos na peça com uma cabeça de polimento simples [27].	14
Figura 7. Planta do movimento relativo da cabeça polidora na peça com máquinas modernas que permitem uma distribuição um pouco uniforme do brilho pela superfície [27].	15
Figura 8. Esquema do processo de polimento na Revigrés.	16
Figura 9. Máquina de carga (a), máquina de carga e fotocélula (b). A fotocélula está rodeada por um círculo vermelho.	16
Figura 10. Máquina onde as peças passam para serem calibradas (a) e rolos diamantados (b).	17
Figura 11. Primeira máquina onde as peças passam para serem polidas.	17
Figura 12. Segunda máquina onde as peças passam para serem polidas.	18
Figura 13. Abrasivo magnésítico com partículas de carboneto de silício (a) e abrasivo sintético com grão de diamante (b).	18
Figura 14. Retificadora.	19
Figura 15. Forno onde as peças são aquecidas (a), máquina de cera (b).	19
Figura 16. Tonalizadora.	20
Figura 17. Escolha (a) e embalamento (b).	20
Figura 18. Sequência do tamanho de abrasivos utilizados na calibradora e nas máquinas de polimento da linha 2.	27
Figura 19. Sequência dos tamanhos do grão de diamante utilizados na calibradora da linha 3.	28
Figura 20. Sequência dos tamanhos do grão de carboneto de silício na primeira e segunda máquina de polimento na linha 3.	28
Figura 21. Sequência dos tamanhos dos abrasivos <i>fickerts</i> na primeira e segunda máquina de polimento na linha 3.	29
Figura 22. Agentes manchantes utilizados no ensaio da determinação da resistência às manchas.	30
Figura 23. Teste de resistência às manchas.	30
Figura 24. Classificação dos resultados do ensaio da resistência às manchas [29].	32
Figura 25. Posições onde foram feitas as cinco medições de brilho nas peças (à esquerda) e medidor de brilho Horiba Gloss Checker IG-331, em que a superfície onde se calibra o instrumento está rodeada a vermelho (à direita).	34
Figura 26. Sistema ótico do medidor de brilho Horiba Gloss Checker IG-331 [31].	34
Figura 27. Medidor da rugosidade superficial (a) e apalpador que é posicionado sobre a amostra (b).	35
Figura 28. Valor da rugosidade média (Ra) [33].	36
Figura 29. Determinação da rugosidade profunda (Rz) [33].	36

Figura 30. Equipamento de abrasão profunda.....	37
Figura 31. Ensaio à resistência à abrasão profunda.....	38
Figura 32. Comprimento da corda L de incisão (cm) em dois pontos perpendiculares na superfície.	39
Figura 33. Determinação do ângulo no centro do disco rotativo de acordo com o comprimento da corda (mm).	40
Figura 34. Abrasímetro.....	41
Figura 35. Câmara de abrasão sobre a superfície vidrada da amostra.....	41
Figura 36. Difratoograma e indicação das fases mineralógicas do produto cromática superbranco sinterizado a 1215 °C durante cerca de 60 minutos.	46
Figura 37. Microestrutura obtida por microscopia eletrónica de varrimento (SEM) (à esquerda) e mapa de EDS dessa mesma imagem (à direita).	47
Figura 38. Micrografias obtidas por SEM da superfície da peça natural cromática superbranco (a, a ₁), da superfície após a etapa de calibração (b, b ₁), após passar na 1ª máquina de polimento (c, c ₁) e após passar na 2ª máquina de polimento (d, d ₁).	48
Figura 39. Micrografias da secção transversal da peça cromática superbranco natural.....	49
Figura 40. Gráfico com os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) da superfície das peças cromática superbranco naturais e polidas ao longo do processo de polimento.....	50
Figura 41. Gráfico com os valores do módulo de rutura (N/mm ²) e da carga de rutura (N) das peças cromática superbranco naturais e polidas ao longo do processo de polimento...	52
Figura 42. Difratoograma e indicação das fases mineralógicas do produto cromática ice sinterizado a 1215 °C durante cerca de 60 minutos.	54
Figura 43. Microestrutura obtida por microscopia eletrónica de varrimento (SEM) (à esquerda) e mapa de EDS dessa mesma imagem (à direita).	55
Figura 44. Micrografias obtidas por SEM da superfície do produto cromática ice.	55
Figura 45. Micrografias obtidas por SEM da superfície da peça natural cromática ice (a, a ₁), da superfície após a etapa de calibração (b, b ₁), após passar na 1ª máquina de polimento (c, c ₁) e após passar na 2ª máquina de polimento (d, d ₁).	57
Figura 46. Micrografias da secção transversal da peça cromática ice natural.....	59
Figura 47. Gráfico com os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) da superfície das peças cromática ice natural e polidas ao longo do processo de polimento.	60
Figura 48. Valores do módulo de rutura (N/mm ²) e da carga de rutura (N) das peças cromática ice naturais e polidas ao longo do processo de polimento.....	61
Figura 49. Difratoograma e indicação das fases mineralógicas do produto travertino silver sinterizado a 1210 °C durante cerca de 60 minutos.	64
Figura 50. Imagem SEM (à esquerda) onde foi realizado o EDS pontual (à direita) para identificar elementos existentes nos cristais.....	65
Figura 51. Micrografia obtida por SEM da superfície da peça natural travertino silver (a), da superfície após passar na 1ª máquina de polimento (b) e após passar na 2ª máquina de polimento (c).	66
Figura 52. Micrografias da secção transversal da peça travertino silver natural.....	67
Figura 53. Gráfico com os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) da superfície das peças travertino silver natural e polidas ao longo do processo de polimento.....	68
Figura 54. Valores do módulo de rutura (N/mm ²) e da carga de rutura das peças travertino silver naturais e polidas ao longo do processo de polimento.	69

Figura 55. Fotografias dos resultados do ensaio de resistência à abrasão superficial das peças travertino silver naturais (a) e polidas (b) com 750, 900 e 1500 rpm.	71
Figura 56. Micrografias obtidas por SEM das peças cromática superbranco polidas com todas as etapas do processo de polimento (a) e sem a etapa de calibração (b).....	75
Figura 57. Gráfico com os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.....	76
Figura 58. Micrografias obtidas por SEM das peças cromática ice polidas com todas as etapas do processo de polimento (a) e sem a etapa de calibração (b).	79
Figura 59. Gráfico com os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.....	81

Índice de tabelas

Tabela 1. Características técnicas do grés porcelânico segundo as normas ISO [1].	3
Tabela 2. Custos do processo de polimento na empresa Revigrés relativamente à energia elétrica, mão-de-obra e materiais abrasivos.	21
Tabela 3. Apresentação dos produtos usados, com as correspondentes pastas, temperaturas de sinterização (°C) e formatos (cm).	25
Tabela 4. Indicação das composições das pastas do produto cromática superbranco, cromática ice e travertino silver.	25
Tabela 5. Condições em que as peças são retificadas e polidas.	26
Tabela 6. Número de cabeças na etapa de calibração e de polimento na linha 2 e 3.	27
Tabela 7. Carga abrasiva segundo a norma ISO 10545-7.	40
Tabela 8. Área ocupada por poros (%) e diâmetro médio dos poros (μm) do produto cromática superbranco polido ao longo do processo de polimento.	49
Tabela 9. Valores de brilho (%) na superfície da peça cromática superbranco natural e polida ao longo do processo de polimento.	51
Tabela 10. Valores médios do comprimento da corda de incisão (mm) e do volume removido (mm^3) das peças cromática superbranco naturais e polidas.	52
Tabela 11. Classificação da remoção das manchas nas peças cromática superbranco naturais e polidas ao longo do processo de polimento.	53
Tabela 12. Área ocupada por poros (%) e diâmetro médio dos poros (μm) do produto cromática ice polido ao longo do processo de polimento.	58
Tabela 13. Valores de brilho (%) na superfície da peça cromática ice natural e polida ao longo do processo de polimento.	60
Tabela 14. Valores médios do comprimento da corda de incisão (mm) e do volume removido (mm^3) das peças cromática ice naturais e polidas.	62
Tabela 15. Classificação da remoção das manchas nas peças cromática ice naturais e polidas ao longo do processo de polimento.	63
Tabela 16. Área ocupada por poros (%) e diâmetro médio dos poros (μm) do produto travertino silver polido ao longo do processo de polimento.	67
Tabela 17. Valores de brilho (%) na superfície da peça travertino silver ao longo do processo de polimento.	69
Tabela 18. Classificação da remoção das manchas nas peças travertino silver naturais e polidas ao longo do processo de polimento.	72
Tabela 19. Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados nos produtos cromática superbranco e cromática ice naturais e polidos.	73
Tabela 20. Área ocupada por poros (%) e diâmetro médio dos poros (μm) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.	76
Tabela 21. Valores de brilho (%) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.	77
Tabela 22. Valores do módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura (N) das peças cromática superbranco polidas com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.	77
Tabela 23. Classificação da remoção das manchas no produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.	78
Tabela 24. Área ocupada por poros (%) e diâmetro médio dos poros (μm) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.	80

Tabela 25. Valores de brilho (%) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.	81
Tabela 26. Valores do módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura (N) das peças cromática ice polidas com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.	82
Tabela 27. Classificação da remoção das manchas no produto polido cromática ice com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.	82

Lista de símbolos

d	Diâmetro do disco rotativo (mm)
D	Distância entre apoios (mm)
e	Espessura da peça (mm)
F	Força exercida (N)
h	Espessura do disco rotativo (mm)
L	Largura da peça (mm) (Eq.7)
L	Comprimento da corda (mm) (Eq.8)
P ₀	Peso das peças em seco (g)
P ₁	Peso das peças húmidas (g)
P ₂	Peso das peças imersas em água (g)
α	Ângulo determinado pela corda no centro do disco rotativo (°)

Lista de abreviaturas

DRX	Difração de Raios-X
EDS	Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios-X (<i>Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy</i>)
EN	Norma Europeia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JCPDS	<i>Joint Committee on Powder Diffraction Standards</i>
PEI	<i>Porcelain Enamel Institute</i>
Ra	Rugosidade média
Rmax	Profundidade máxima de rugosidade
Rz	Rugosidade profunda
SEM	Microscopia Eletrónica de Varrimento (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

1.1. Empresa Revigrés

A empresa Revigrés situada na zona industrial de Barrô, no concelho de Águeda, é especializada na produção de revestimentos e pavimentos cerâmicos, (como, monoporosa, porcelanato técnico e porcelanato esmaltado). Esta dispõe de instalações fabris modernas e atualizadas bem como o edifício administrativo, social e comercial. Sendo este último e o *showroom* da sede, da autoria do arquiteto Álvaro Siza Vieira. Dispõem também de um *showroom* em Lisboa de forma a prestarem um serviço mais direto e completo aos seus clientes [1].

A Revigrés foi fundada em 1977 por um grupo de empresários, sendo presidida até 2007 pelo fundador Eng. Adolfo Roque. Atualmente o Conselho de Gerência é formado pela Dra. Paula Roque, Comendador Augusto Gomes e Eng. Paulo Conceição [1].

Tendo sido fundada em 1977, foi em 1978 que deu início à produção. Em 1981 foi instalada a segunda linha de produção o que permitiu duplicar a capacidade fabril, aumentando a sua capacidade de resposta junto dos clientes. Em 1995 a empresa foi certificada pelo Sistema de Gestão da Qualidade, sendo a primeira empresa deste setor a ser certificada. No ano 2000 foi instalada a linha de polimento e em 2001 iniciaram a produção do Grés porcelânico [1].

A Revigrés é sem dúvida uma referência na área da cerâmica tradicional, nacional e estrangeira, e tem-se pautado pelo constante desenvolvimento de produtos inovadores. São prova disso o Prémio de Design de Produto no âmbito dos Prémios Nacionais de Design com a coleção mais completa a nível mundial em porcelanato com 38 cores em variados formatos e acabamentos. Outras coleções importantes são as Coleções de Autor, criadas por autores de grande reconhecimento na arquitetura e artes plásticas [1].

Para além destes, a Revigrés foi distinguida com vários prémios e distinções, tais como: o Prémio Europeu de Gestão de Design em 2010, sendo a única empresa deste setor a ter recebido este prémio; foi distinguida pelo projeto de Boas Práticas em Investigação e Inovação, em parceria com a Universidade de Aveiro em 2011, nos prémios Europeus de Iniciativa Empresarial; ganhou o prémio de Empresa Eficiente nos prémios de Eficiência

Energética em 2010 e o prémio Alfa de Oro, em 2009 na Espanha, tendo sido a única empresa estrangeira a ser distinguida pela Sociedade Espanhola de Cerâmica e Vidro [1].

1.2. O grés porcelânico: definições e propriedades

Grés porcelânico é definido como sendo um revestimento cerâmico totalmente vitrificado e impermeável, produzido a partir da mistura de argilas, areia e feldspatos. É caracterizado pelas suas importantes propriedades tecnológicas, o que permite a sua utilização em residências, sectores comerciais e industriais [2-4].

Segundo a norma ISO 13006 (International Organization for Standardization), pertence ao grupo BIa, apresentando uma absorção de água inferior a 0,5%, alta resistência mecânica ($\geq 35 \text{ N/mm}^2$) e à abrasão ($< 175 \text{ m}^3$), como mostra a tabela 1. Destaca-se também devido à sua elevada resistência química e ao gelo, bem como a sua semelhança às pedras naturais [6]. Pode classificar-se de acordo com o seu acabamento final em natural, esmaltado (a sua superfície é vidrada) e polido (superfície lisa e brilhante).

Tabela 1. Características técnicas do grés porcelânico segundo as normas ISO [1].

Normas ISO	Características técnicas	Grés porcelânico técnico	Grés porcelânico esmaltado
ISO 10545-3	Absorção de água (método de ebulição)	<0,5%	<0,5%
ISO 10545-4	Módulo de rutura (N/mm ²)	>35	>35
	Carga de rutura (N) Espessura $\geq 7,5$ mm	>1300	>1300
ISO 10545-6	Resistência à abrasão profunda (Volume removido/mm ³)	<175	-
ISO 10545-7	Resistência à abrasão (Grupos PEI)	-	Grupos PEI II-III-IV-V
ISO 10545-9	Resistência ao choque térmico	Exigida*	Não aplicável
ISO 10545-12	Resistência ao gelo	Exigida*	Exigida*
ISO 10545-14	Resistência às manchas	Mín. Classe 3	Mín. Classe 3

*O material tem de ser resistente e não apresentar defeitos visíveis.

1.3. O processo de fabrico da empresa Revigrés

O processo cerâmico é um conjunto sequencial de etapas, que neste caso têm como objetivo transformar as matérias-primas em produto final. Na figura 1 é apresentado o processo de fabrico do grés porcelânico.

Como representado no esquema, numa primeira etapa são recebidas as materiais-primas. Estas são inicialmente controladas, e as análises realizadas são: o controlo da humidade, o resíduo ao peneiro, a retração, a perda ao rubro e controlo da cor, uma vez que é fundamental manter a homogeneidade do lote de modo a evitar variações de morfologia composição química e tonalidade da composição inicial.

As matérias-primas são depois armazenadas para serem utilizadas nas seguintes etapas do processo. As matérias-primas não plásticas (duros) sofrem o processo de moagem em meio húmido, enquanto que as plásticas, como argilas e caulinos, são diluídas num turbo diluidor em presença de água e desfloculantes.

A moagem é uma etapa importante, pois a granulometria das matérias-primas duras deve ser controlada de forma a garantir a eficácia das etapas posteriores: transporte, conformação e reatividade. Para esta etapa é usado o moinho de bolas, que é composto por um cilindro revestido com materiais cerâmicos de elevada dureza, onde se encontram bolas de materiais cerâmicos igualmente duras. São usados materiais cerâmicos nos dois elementos para diminuir a probabilidade de contaminações no material a moer. Os moinhos usados na empresa são contínuos e descontínuos, em que o cilindro está subdividido em duas câmaras com diferentes tamanhos de corpos moentes. Em ambos os moinhos, a carga (material a moer e corpos moentes) é levada até ao topo do cilindro quando este roda e a sua queda por ação da gravidade origina a fragmentação do material a moer [5]. Na segunda câmara dos moinhos tanto descontínuo como contínuo, ocorre a mistura do material que estava na primeira câmara com a matéria-prima plastificante que foi diluída em tanques diluidores.

O controlo da moagem inclui a avaliação da densidade, viscosidade e resíduo ao peneiro da pasta após moagem. O valor do resíduo ao peneiro de 45 μm é inferior a 0,5%, para favorecer as reações de vitrificação e densificação do produto sinterizado [2]. Quanto mais pequenas as partículas, maior a sua área específica logo maior a sua reatividade durante a sinterização.

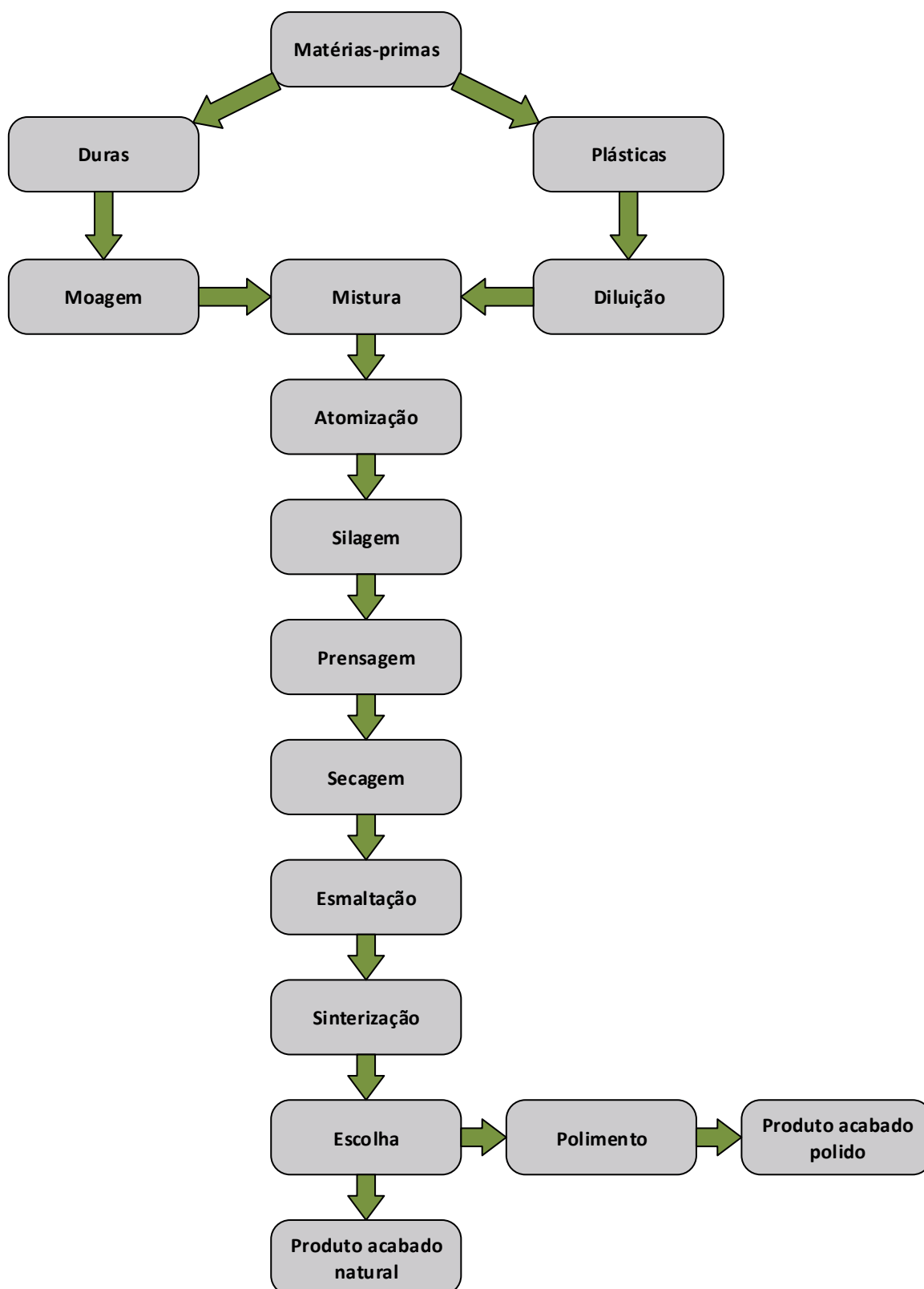


Figura 1. Representação esquemática do processo de fabrico do grés porcelânico.

As duas suspensões (dos duros e plásticos) são misturadas como referido anteriormente, e no caso das pastas que são para colorir, são colocadas num tanque onde é adicionado o pigmento em suspensão. As suspensões são então atomizadas, dando origem ao pó que será posteriormente prensado. A atomização consiste na secagem de uma suspensão por pulverização numa câmara aquecida. A subdivisão da suspensão em pequenas gotículas confere-lhes uma elevada área de superfície, que facilita o processo de secagem e ao mesmo tempo permite controlar a morfologia e a humidade residual do pó. Os objetivos desta etapa são a produção de um pó seco com características morfológicas, de fluidez, de compatibilidade e de compressibilidade otimizadas para ser prensado. Sendo que as últimas dependem diretamente da morfologia dos pós. O pó atomizado tem uma forma esférica ou sub-esférica, fundamental para o enchimento e empacotamento no molde de prensagem. Este pó com humidade que varia entre 4,5 a 5,5% dependendo das pastas, é armazenado em silos durante cerca de 24 horas para homogeneização [6, 7].

Após o tempo de homogeneização da humidade, os pós atomizados passam pela etapa de prensagem que tem como propósito a conformação e a diminuição da porosidade interna de forma a atingir-se o máximo grau de densificação em verde [8]. A conformação é realizada por prensagem unidirecional, ou seja, a pressão é exercida numa só direção. São utilizadas prensas hidráulicas que permitem prensar peças com pressões entre 400 a 500 kg/cm², valores também usados na empresa [8].

Após a conformação que se pretende dar à peça, esta é submedida ao processo de secagem. Este processo consiste na retirada de água na peça, utilizando-se secadores com temperaturas de ar entre 150 a 170 °C. As peças cerâmicas entram no secador com uma humidade de cerca de 5%, e após o processo de secagem estas saem com uma humidade de cerca de 0,5%. A velocidade a que as peças são secas depende do tamanho das mesmas.

Posteriormente à secagem, as peças são sinterizadas em fornos de rolos com ciclos de 45 a 70 minutos, dependendo do formato das peças, e a temperaturas de 1210 a 1220 °C. No caso das peças esmaltadas, estas são previamente vidradas antes da cozedura. Nesta etapa é aplicada uma camada de vidrado por campânula [9]. Após o vidrado é feita a impressão digital (serigrafia) e posteriormente a peça é, ou não, coberta por granilha, por via húmida de forma a garantir a adesão das mesmas à superfície. A granilha têm como principais funções o aumento da resistência à abrasão e conferir um aspeto estético mais agradável, mais natural [10]. Após a sinterização alguns dos produtos produzidos entram na etapa de

polimento, etapa essa que será descrita com mais detalhe na secção 1.5. Finalmente as peças são analisadas de forma automatizada, sendo divididas em classes. As peças que não tiverem nenhum defeito são classificadas como primeira classe, sendo logo empacotadas. As que apresentam diferenças a nível de dimensões são redirecionadas para a secção de acabamentos, onde são retificadas, acrescentando valor ao produto final.

1.4. Matérias-primas, formação de fases e desenvolvimento microestrutural

Segundo a literatura a composição típica do grés porcelânico contém 30-40% de argilas, 45-55% fundentes e 5-20% de quartzo (figura 2). Mais de 95% da composição de grés porcelânico é composta por sílica, alumina e compostos com sódio e potássio. Do ponto de vista químico esta composição pode ser expressa num sistema de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ [11].

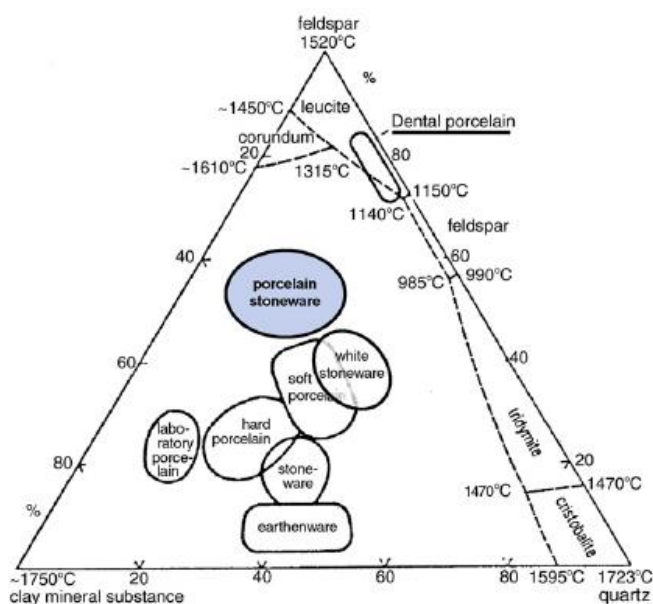


Figura 2. Diagrama ternário com variações de formulação de grés porcelânico em argila-quartzo- feldspato [11].

As matérias-primas argilosas, como argilas, “ball clays”, caulinos entre outros, estão agrupados no grupo das matérias-primas plásticas. As argilas têm como função proporcionar

plasticidade, garantindo a trabalhabilidade do produto, um bom comportamento durante a prensagem e adequada resistência mecânica após secagem [2].

Dentro do grupo dos materiais argilosos, os caulinos ou argilas cauliniticas, aluminossilicatos ricos em alumina e “puros” do ponto de vista de composição química, contribuem para a brancura do produto e também para a reação de vitrificação, durante a sinterização, formando mulite que atua como esqueleto do corpo contribuindo para o aumento da resistência mecânica [6, 12].

Os fundentes, têm por função promover a formação de uma fase líquida durante a sinterização mais ou menos reativa, cuja tensão superficial promove a aproximação entre as partículas do corpo cerâmico [13]. Existem fundentes de baixa e alta temperatura. No caso do grés porcelânico os fundentes são maioritariamente feldspatos. Os feldspatos mais usados são o feldspato sódico ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) também conhecido como ortoclásio, e feldspato potássico ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) também conhecido como albite. A quantidade de feldspato diminui fortemente a porosidade, uma vez que a densificação é promovida pelo feldspato, aumentando assim a concentração de óxidos alcalinos no líquido fundido, tornando-o menos viscoso o que acelera o processo de sinterização [14].

O inerte mais utilizado é o quartzo ou areia. Este permanece maioritariamente por reagir durante o processo de sinterização. O quartzo facilita a secagem, diminui a plasticidade e a retração, quer durante a secagem quer durante a cozedura, e é muito importante no controlo da expansão térmica do produto [13].

As matérias-primas devem apresentar baixo teor de óxidos colorantes como Fe_2O_3 e TiO_2 para evitar a coloração da pasta, uma vez que a eficácia dos pigmentos adicionados na composição para a colorir dependem diretamente da brancura do produto sinterizado [2].

Como se pode ver na figura 3, por volta dos 1050 °C começa a formação abundante de fase vítrea com a fusão do feldspato, durante a qual o material fundido enche os poros do corpo, sob a influência da pressão capilar, contribuindo para a formação de um corpo denso. Na fase final de sinterização, acima de 1220 °C ocorre uma diminuição na taxa de densificação e a composição parece atingir o equilíbrio e as únicas transformações que ocorrem são dissolução/precipitação de mulite e alguma dissolução do quartzo na fase líquida.

Devido ao ciclo de sinterização ser de apenas 50-60 minutos, a maioria das reações e processos que ocorrem durante a sinterização são regidos por questões cinéticas e não atingem o equilíbrio termodinâmico [15].

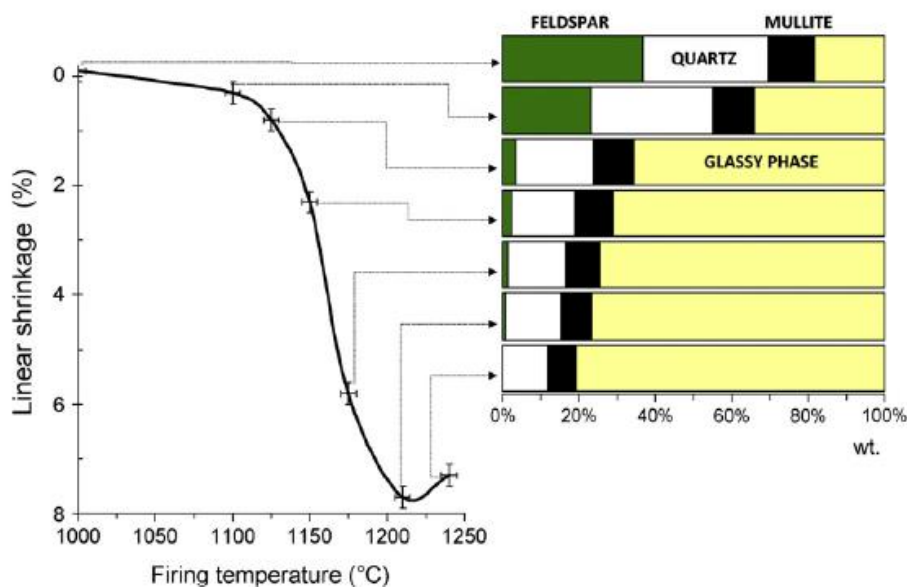
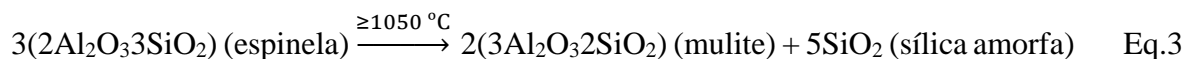
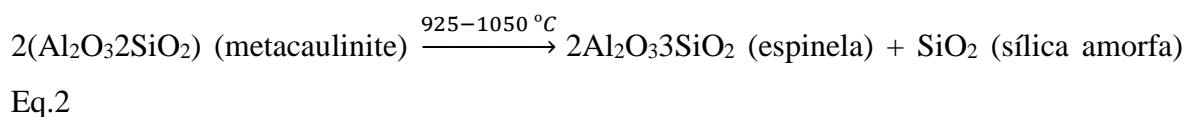
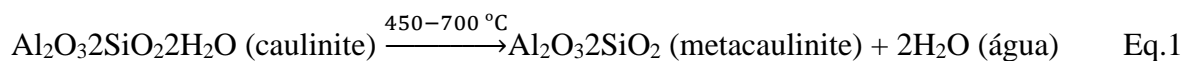


Figura 3. Transformação de fases que ocorrem durante a sinterização do grés porcelânico [11].

Durante a sinterização ocorrem várias reações, tais como [11, 16]:

- Liberação da água adsorvida a aproximadamente 120 °C;
- Liberação da água zeolítica até aos 200 °C;
- Decomposição da matéria orgânica que ocorre frequentemente entre 350 e 600 °C;
- Transformação de quartzo α em quartzo β a 573 °C;
- Entre os 450 e 700 °C, dá-se a formação de componentes amorfos (metacaulinite) a partir da decomposição de minerais de argila (caulinite) com liberação da água de constituição (Eq. 1);
- De 925 a 1050 °C ocorre a decomposição da metacaulinite e formação de aluminossilicatos (espinela) e sílica amorfa (Eq. 2);
- Acima de 1050 °C ocorre a cristalização da mulite a partir da decomposição da espinela com segregação de sílica amorfa (Eq. 3).



A mulite é encontrada na matriz vítrea em poucas quantidades (até 8%) devido ao ciclo rápido de sinterização, sendo a principal fase cristalina no grés porcelânico o quartzo, em que a sua percentagem em peso pode ser superior a 30% [17]. A fase vítrea, sendo quantitativamente predominante varia de 40 a 80% em peso dependendo das composições do grés porcelânico [11].

A viscosidade da fase líquida é muito importante para o desenvolvimento da microestrutura do grés porcelânico durante a cozedura porque, se esta for baixa os poros e os vazios são melhor preenchidos, assim como, os gases aprisionados podem escapar mais facilmente [18].

Segundo a literatura [17, 19, 20] a porosidade mínima no grés, ou seja, a máxima densificação, é conseguida com a temperatura de sinterização por volta de 1210 e 1220 °C. Para temperaturas baixas de sinterização (1160 °C) a matriz apresenta um elevado grau de porosidade com poros interligados, enquanto que para temperaturas mais elevadas (1240 °C), esta torna-se mais compacta com poros fechados e isolados, que é uma característica da sobrecozedura.

Caso a temperatura de sinterização seja muito elevada, pode ocorrer deformação do corpo cerâmico, aparecimento de defeitos e redução da densidade [11].

Outros fatores que influenciam a microestrutura são o tamanho e a quantidade de partículas de quartzo. Entre 64 a 85% do quartzo presente na composição inicial permanece não dissolvido após a sinterização, devido ao ciclo rápido de cozedura o que provoca o aumento da heterogeneidade microestrutural, elevando o tamanho e o volume de poros, bem como o número de fissuras internas e periféricas [19, 20].

Para composições com o mesmo tamanho de partículas de quartzo, a taxa de dissolução do quartzo para a fase vítrea à temperatura de densificação máxima não depende significativamente da quantidade de quartzo. Embora, seja ligeiramente influenciada pela

dimensão das partículas de quartzo, uma vez que as partículas de menor tamanho se dissolvem mais rapidamente do que grãos maiores, devido à sua maior área superficial [20].

As propriedades tecnológicas do grés porcelânico, tais como a absorção de água, propriedades mecânicas, resistência química, resistência ao gelo e resistência às manchas são dependentes da microestrutura do material, essencialmente da porosidade, que por sua vez é dependente da composição inicial e tratamento térmico.

1.5. O polimento, razão do polimento, descrição do polimento da Revigrés

O processo de polimento consiste em 3 etapas. A primeira etapa é a etapa de calibração, em que ocorre um desgaste acentuado com o intuito de planificar a superfície da peça, para que nas futuras etapas o polimento seja igual em toda a superfície. São utilizadas máquinas de polimento com rolos de diamante com tamanho de grão de 250-300 μm [21]. Esta etapa induz tensões residuais e provoca fendas profundas, ou seja, uma acentuada deterioração na superfície da peça, o que pode causar uma diminuição nas características mecânicas e no seu desempenho [21-23].

Nas restantes etapas são utilizados abrasivos que contêm partículas de carboneto de silício embutidas numa matriz orgânica ou inorgânica de composição variável, em que o tamanho de grão diminui ao longo do processo de forma a reduzir os danos causados pela primeira etapa [21-23]. Assim sendo, a segunda etapa tem como finalidade eliminar os riscos deixados pela etapa anterior, diminuir a rugosidade, deixando a peça totalmente uniforme usando grãos de tamanho 36 (600 μm) a 280 (36,5 μm) [21]; na terceira etapa procede-se a um polimento com abrasivos muito finos de grão 400 (17,3 μm) a 1500 [21], de forma a conferir brilho e o acabamento necessário à superfície do cerâmico [24]. No final deste processo é removido até 10% da espessura do material [22].

Para um processo de polimento ser correto, os parâmetros de processamento devem eliminar por completo os danos causados pela primeira etapa, recuperando as melhores características do material. Este é um processo crítico, caro e que depende consideravelmente das características microestruturais do material e dos parâmetros de processamento selecionados, embora seja estabelecido com base na experiência dos operadores [23].

Uma linha de polimento é geralmente composta por 20 a 30 cabeças polidoras, dispostas numa sequência, em que a distância entre duas cabeças é fixa. Cada cabeça contém uma placa giratória horizontal onde os abrasivos são colocados em simetria radial, como se pode ver na figura 4 [23].

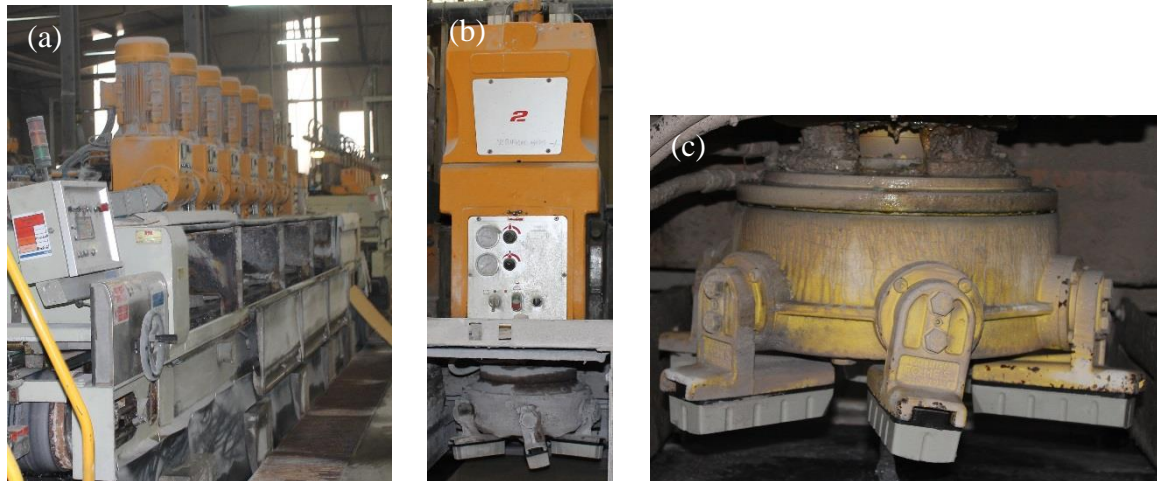


Figura 4. Linha de polimento (a), uma cabeça polidora (b) e placa giratória com os abrasivos (c).

Cada abrasivo executa um movimento oscilatório em torno do seu próprio eixo longitudinal, com o objetivo de o seu consumo ser homogéneo, uma vez que promove o movimento de todas as partículas abrasivas como se pode ver na figura 5.

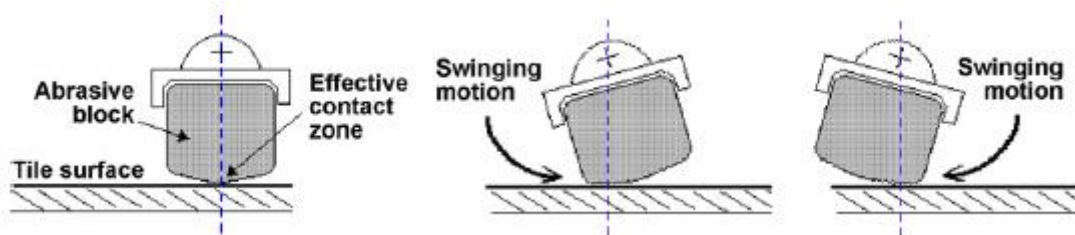


Figura 5. Movimento oscilatório do abrasivo o que permite que o seu consumo seja homogéneo [2].

Existem dois tipos de máquinas de polimento: as simples e as modernas. Nas simples existe o movimento de rotação das cabeças e o movimento do tapete onde são transportadas as peças durante o processo [25, 26]. Nas modernas existe o movimento de rotação das

cabeças, assim como a oscilação lateral das mesmas que é feito de um modo sincronizado e o movimento do tapete [25].

Um problema que ocorre nas máquinas simples é que durante o polimento as laterais da peça sofrem mais contacto com os abrasivos do que o centro, o que faz com que o brilho não fique distribuído uniformemente pela peça, estando as zonas laterais mais bem polidas e, conseqüentemente com mais brilho, como podemos ver na figura 6. Isto acontece devido à falta de abrasivos no centro das cabeças, ou seja, entre dois blocos abrasivos radialmente opostos [25, 27].

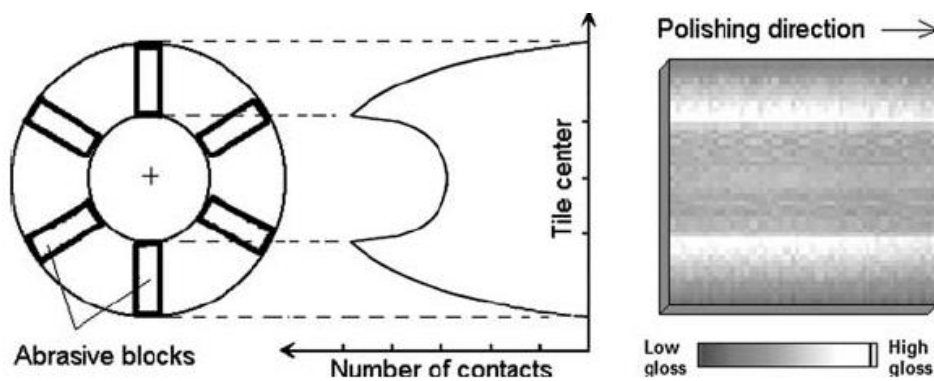


Figura 6. Perfil do número de contactos dos abrasivos na peça com uma cabeça de polimento simples [27].

Nas máquinas modernas este problema é reduzido, uma vez que as cabeças de polimento não permanecem sempre na mesma posição (figura 7), distribuindo desta forma o brilho pela peça [25, 27].

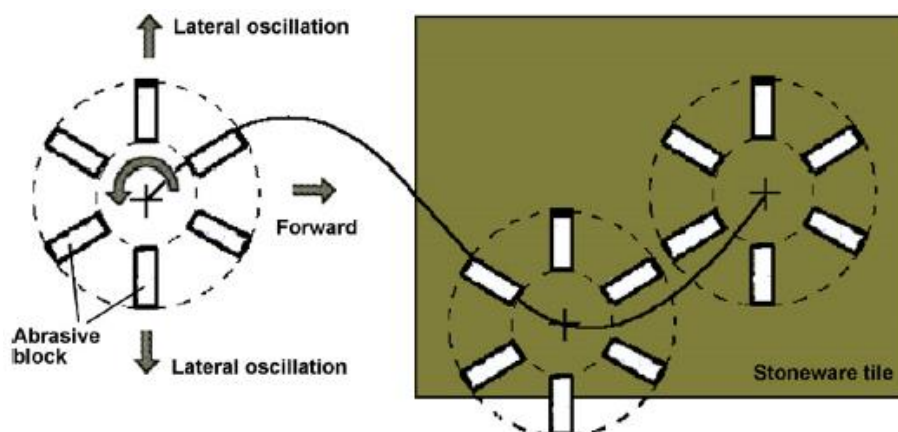


Figura 7. Planta do movimento relativo da cabeça polidora na peça com máquinas modernas que permitem uma distribuição um pouco uniforme do brilho pela superfície [27].

Porém, podem ser observadas diferenças em relação ao brilho em diferentes peças e na mesma peça sob as mesmas condições de processamento. Isto porque o brilho é definido pela microestrutura e pela porosidade da superfície, características importantes e que podem variar nas peças [27].

O processo de polimento na Revigrés foi instalado no ano 2000, e é realizado da mesma forma para os diferentes produtos, sendo otimizado empiricamente, à luz do que se passa no polimento das pedras naturais.

O equipamento do polimento consiste em vários tipos de cabeças polidoras e materiais abrasivos com diferentes granulometrias de grão, podendo-se controlar a velocidade de rotação das cabeças, a oscilação lateral das mesmas, a velocidade do tapete e a quantidade de água.

A água é distribuída em cada cabeça polidora tendo como principal função diminuir o atrito entre os abrasivos e a peça, bem como retirar os resíduos gerados que poderiam ficar sobre as peças causando riscos [24]. É utilizada uma grande quantidade de água sendo por isso tratada e reutilizada.

O processo é constituído por 3 linhas e está esquematizado na figura 8.

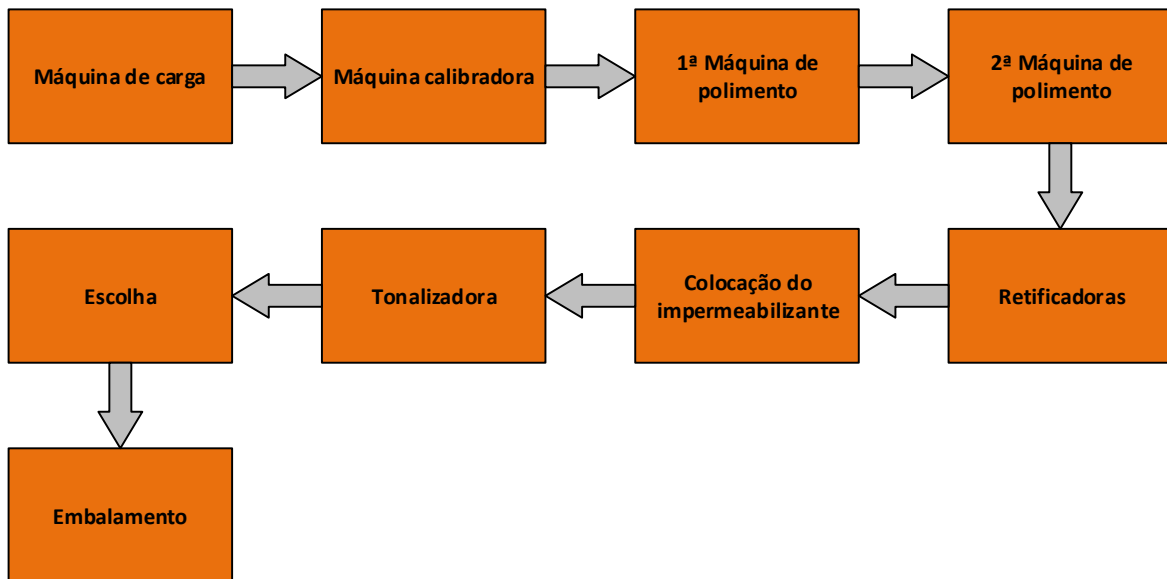


Figura 8. Esquema do processo de polimento na Revigrés.

Cada linha possui uma máquina de carga (figura 9) que tem como função colocar as peças no tapete. Estas são contadas por uma fotocélula que envia a informação para um contador. Depois, as peças em fila dirigem-se para a máquina calibradora que tem como função nivelar a superfície da peça, retirando cerca de 0,5 mm de material (figura 10). Esta possui 8 ou 10 cabeças de polimento, dependendo da linha, com 8 rolos diamantados por cabeça.



Figura 9. Máquina de carga (a), máquina de carga e fotocélula (b). A fotocélula está rodeada por um círculo vermelho.

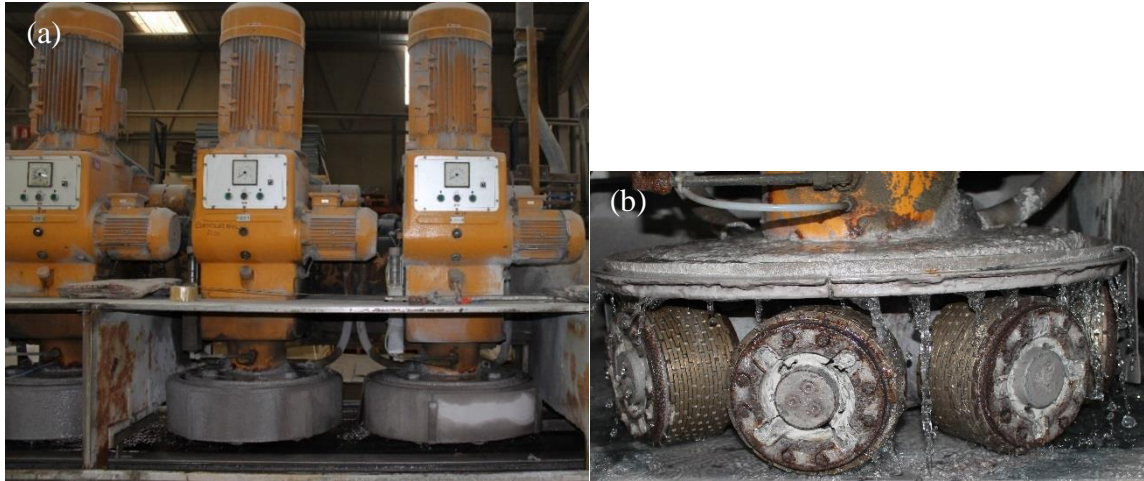


Figura 10. Máquina onde as peças passam para serem calibradas (a) e rolos diamantados (b).

Posteriormente as peças passam para a primeira máquina de polimento. Esta máquina possui 10 ou 18 cabeças, dependendo da linha, e cada cabeça possui 8 abrasivos. A sua função é eliminar os defeitos deixados pela máquina anterior e diminuir a rugosidade da superfície (figura 11). Nesta etapa são retirados cerca de 0,2 mm de material.



Figura 11. Primeira máquina onde as peças passam para serem polidas.

Seguidamente as peças passam para uma segunda máquina de polimento com 18 cabeças, e cada cabeça possui 8 abrasivos, que têm como função conferir brilho e o acabamento necessário à superfície, sendo retirado cerca de 0,1 mm de material (figura 12).



Figura 12. Segunda máquina onde as peças passam para serem polidas.

Na primeira e segunda máquina de polimento são usados abrasivos magnésíticos com partículas de carboneto de silício (figura 13 (a)) e os sintéticos com grão de diamante (figura 13 (b)).

O abrasivo mais usado no processo de polimento do grés porcelânico técnico é o carboneto de silício, com uma dureza de 9 na escala de Mohs, sendo o cimento de oxiclureto de magnésio (MOC) usado como material de matriz, devido à sua boa capacidade de ligação aos agregados e uma boa resistência à abrasão [28]. Este cimento MOC também é conhecido como cimento magnésiano (*magnesia cement*) e cimento Sorel.

No polimento de peças esmaltadas são usados abrasivos sintéticos com grão de diamante, denominados de *fickerts*. São abrasivos diamantados resinoides, em que o diamante é produzido industrialmente.

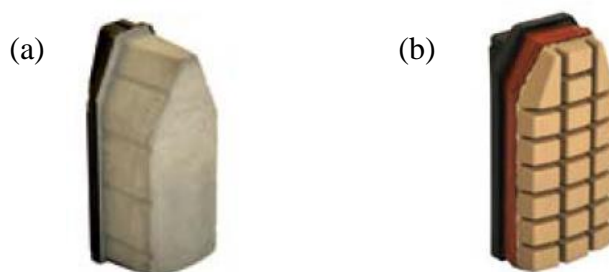


Figura 13. Abrasivo magnésítico com partículas de carboneto de silício (a) e abrasivo sintético com grão de diamante (b).

Posteriormente as peças passam por duas retificadoras, cada retificadora, retifica dois lados da peça. Estas têm como objetivo tornar reto os quatro lados e assegurar que todas as peças possuem o mesmo tamanho. Na figura 14 podemos ver a fotografia de uma retificadora. No final desta etapa as peças são impermeabilizadas com uma cera para proteção da sua superfície para assim serem garantidas as características técnicas tais como a resistência às manchas. O tipo de impermeabilizante varia de material para material assim como o sistema de aplicação varia consoante o tipo de impermeabilizante. As figuras 15 (a) e (b) mostram um tipo de aplicação de impermeabilizante, existente na linha 2, em que as peças são aquecidas num forno a $\pm 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ e depois é colocado o impermeabilizante.



Figura 14. Retificadora.



Figura 15. Forno onde as peças são aquecidas (a), máquina de cera (b).

Seguidamente, as peças passam por uma tonalizadora que possui lentes óticas que leem a superfície da peça em função da sua tonalidade e padrão. Ligada a ela está um timbrador que à saída e consoante a leitura, marca/timbra as peças de lado (figura 16).



Figura 16. Tonalizadora.

Posteriormente a superfície das peças é analisada por um operador (figura 17 (a)) para identificar algum tipo de defeito, as peças são classificadas de primeira qualidade se não tiverem nenhum defeito e de terceira qualidade se tiverem defeitos sendo depois embaladas de acordo com a sua classificação (figura 17 (b)).

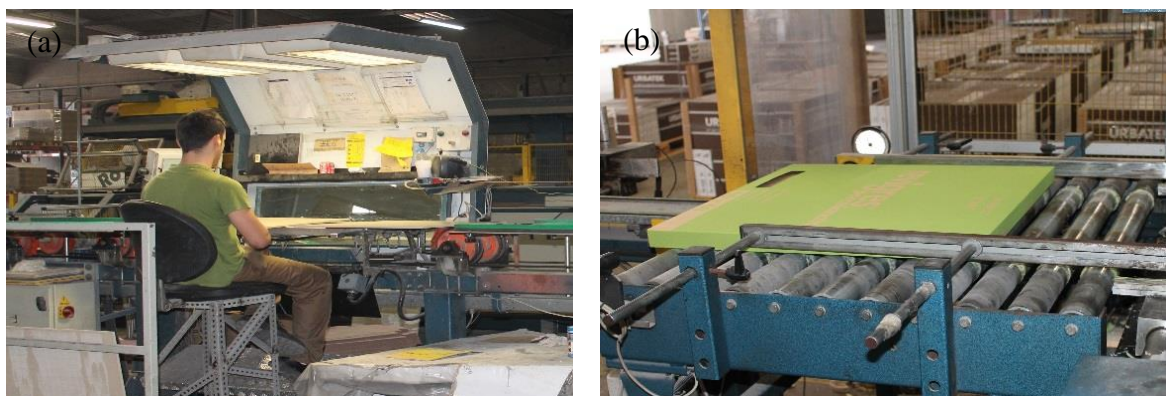


Figura 17. Escolha (a) e embalagem (b).

Os custos associados ao polimento na empresa Revigrés estão apresentados na tabela 2. Estes custos são um somatório da energia elétrica gasta na operação das máquinas e transporte das peças, na mão-de-obra e nos materiais abrasivos.

Tabela 2. Custos do processo de polimento na empresa Revigrés relativamente à energia elétrica, mão-de-obra e materiais abrasivos.

Custos associados ao polimento		
Energia elétrica	Operação das máquinas e transporte das peças	0,50 €/m ²
Mão-de-obra	-	1 €/m ²
Materiais abrasivos	Magnesíticos com partículas de carboneto de silício	0,50 €/m ²
	Sintéticos com grão de diamante	2 €/m ²
Total	-	4 €/m ²

1.6. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral caracterizar e otimizar o processo de polimento de produtos de grés porcelânico da empresa Revigrés.

Com o intuito de caracterizar o processo de polimento, será feita uma caracterização dos vários produtos ao longo deste processo e identificação da influência das diferentes etapas do polimento nas propriedades finais (tais como brilho, resistência mecânica, resistência às manchas, entre outras). Com base nestes dados serão estabelecidas as relações entre as características de cada produto e o seu comportamento ao polimento, e uma adaptação do processo de polimento de forma a minimizar os custos associados a este processo.

Capítulo 2

Materiais e Métodos

2. Materiais e métodos

No âmbito deste trabalho foram selecionados para a caracterização do processo de polimento três produtos alvo: cromática superbranco, cromática ice e travertino silver para se estabelecer e identificar a influência das diferentes etapas do polimento nas propriedades finais. Com este intuito foram realizados vários ensaios que são agora descritos.

2.1. Material a analisar e suas características

Na tabela 3 estão apresentados os produtos cromática superbranco, cromática ice e travertino silver, com as correspondentes pastas, temperaturas de sinterização e formatos.

Tabela 3. Apresentação dos produtos usados, com as correspondentes pastas, temperaturas de sinterização (°C) e formatos (cm).

Produtos	Pastas	Temperatura de sinterização (°C)	Formato (cm)
Cromática superbranco	Pasta tradicional	1215	30×60
Cromática ice	Pasta especial	1215	60×60
Travertino silver (produto esmaltado)	Pasta neutra	1210	30×60

Na tabela 4 estão indicadas as composições das pastas de cada produto em estudo.

Tabela 4. Indicação das composições das pastas do produto cromática superbranco, cromática ice e travertino silver.

	Pasta tradicional Cromática superbranco	Pasta especial Cromática ice	Pasta neutra Travertino silver
Argilas	25%	15%	36%
Caulinos	15%	10%	6%
Feldspatos	50%	45%	51%
Fundentes*	0.5%	8%	-
Branqueadores	10.7%	25%	-
Areia	10%	-	7%
Aditivos	3.6%	-	-

*Outros fundentes para além dos feldspatos.

Caracterização e otimização do polimento de grés porcelânico

As peças vão ter dois tipos de acabamentos, não polido e polido sendo as peças não polidas (naturais) retificadas. As peças retificadas são peças que passaram pelas retificadoras que tem como objetivo tornar reto os quatro lados da peça. Na tabela 5 estão indicadas as condições de retificação e de polimento para cada tipologia.

Tabela 5. Condições em que as peças são retificadas e polidas.

		Cromática superbranco 30×60		Cromática ice 60×60		Travertino silver 30×60
		Calibradora	Primeira e segunda máquina de polimento	Calibradora	Primeira e segunda máquina de polimento	Primeira e segunda máquina de polimento
Polimento	Pressão das cabeças (kgf)	2	2	2	2	1,25
	Velocidade do tapete (m lineares/min)	6	6	4	4	3,5
	*Varejamento (cm)	0	**Ligeiramente	0	13	**8,5
	Tamanho dos abrasivos (mesh)	-	46-1500	-	46-1500	400-2000
		Cromática superbranco 30×60		Cromática ice 60×60		Travertino silver 30×60
Retificação	Velocidade do tapete (m lineares/min)	9		9		9

*O varejamento é a oscilação lateral das cabeças de polimento.

**Nas peças com o formato 30×60cm o varejamento ocorre na segunda máquina de polimento.

As peças em estudos foram polidas na linha 2 ou na linha 3. Na linha 2 são polidas normalmente os formatos 30×60 cm e na linha 3 os formatos 60×60 cm. Na tabela 6 estão indicados o número de cabeças na etapa de calibração e de polimento na linha 2 e 3.

Tabela 6. Número de cabeças na etapa de calibração e de polimento na linha 2 e 3.

Linhas	Calibradora	1ª Máquina de polimento	2ª Máquina de polimento
Linha 2	8	10	18
Linha 3	10	18	18

Na figura 18 é apresentada a sequência dos tamanhos dos grãos abrasivos na calibradora e nas máquinas polidoras utilizados no polimento das peças cromática superbranco na linha 2.

Na calibradora são utilizados rolos de diamante, em que o M9 corresponde a um tamanho de grão maior, com maior agressividade no desbaste da peça e o M13 corresponde a um tamanho de grão mais fino, com função de pré acabamento.

No final da sequência da segunda máquina de polimento existe uma escova (E) para tornar a superfície da peça mais límpida.

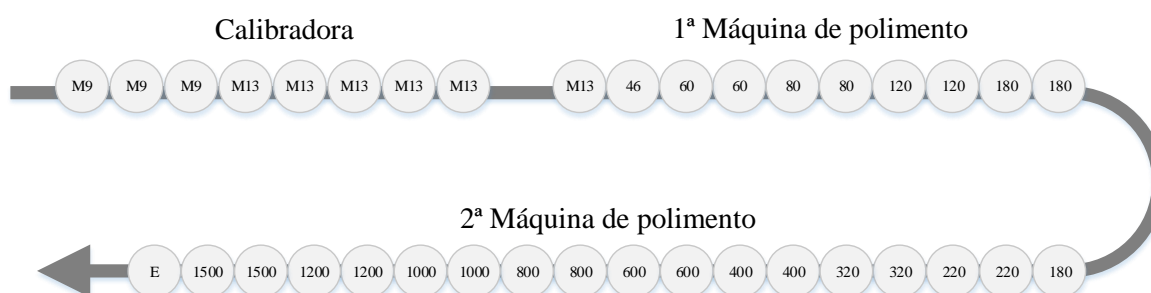


Figura 18. Sequência do tamanho de abrasivos utilizados na calibradora e nas máquinas de polimento da linha 2.

A figura 19 mostra a sequência dos tamanhos do grão de diamante utilizados na calibradora da linha 3 para calibrar as peças cromática ice com formato 60×60 cm. A figura 20 apresenta a sequência dos tamanhos em mesh do grão de carboneto de silício na primeira e segunda máquina de polimento.

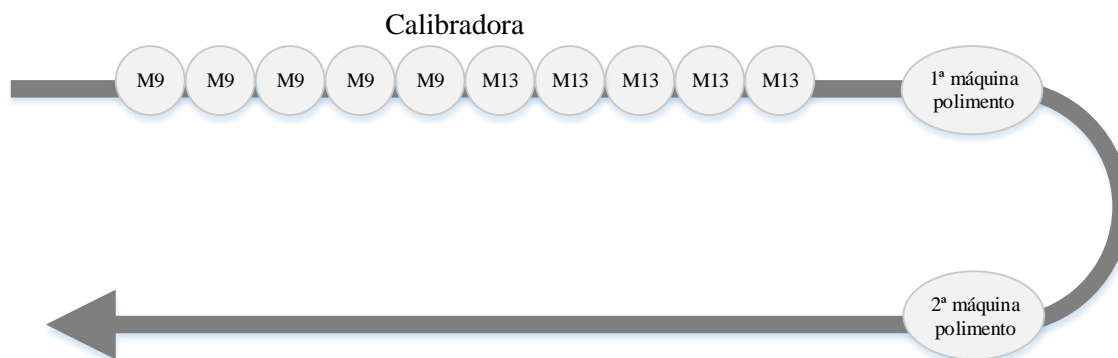


Figura 19. Sequência dos tamanhos do grão de diamante utilizados na calibradora da linha 3.

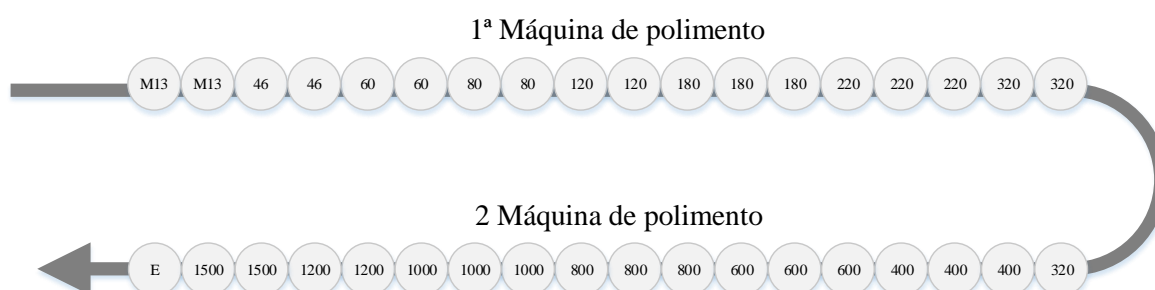


Figura 20. Sequência dos tamanhos do grão de carboneto de silício na primeira e segunda máquina de polimento na linha 3.

O polimento das peças travertino silver com formato 30×60 cm é feito na linha 3. Os abrasivos utilizados para polir esta tipologia são os chamados abrasivos *fickerts*, constituídos por abrasivos sintéticos com grão de diamante. Na figura 21 está apresentada a sequência de abrasivos durante a etapa de polimento.

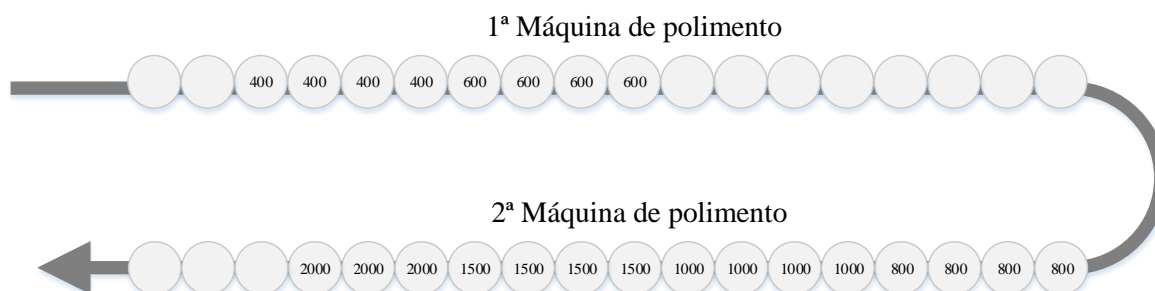


Figura 21. Sequência dos tamanhos dos abrasivos *fickers* na primeira e segunda máquina de polimento na linha 3.

2.2. Métodos

2.2.1. Microscópio eletrónico de varrimento (SEM)

A superfície das peças ao longo do polimento assim como a secção transversal das peças naturais foram observadas no microscópio eletrónico de varrimento, SEM, Hitachi S4100. As análises químicas foram feitas a partir da utilização de um microscópio eletrónico de varrimento Hitachi, SU 70, equipado com acessório de espectroscopia de dispersão de energia (EDS).

A microscopia eletrónica de varrimento baseia-se em fazer incidir um feixe de elétrons a partir de um potencial elétrico na superfície da amostra, na qual deve ser depositada uma camada de carbono que atua como condutor.

2.2.2. Determinação da resistência às manchas

O objetivo deste ensaio é classificar as peças de acordo com a eliminação das manchas. Este ensaio foi realizado em duas amostras naturais e polidas ao longo do processo de polimento dos três produtos em estudo, segundo a norma ISO 10545-14. Para isso foram utilizados três agentes manchantes (figura 22) [29]:

- Agente manchante óxido de crómio verde em óleo leve com uma ação penetrante;
- Agente com ação oxidante como o iodo, solução alcoólica a 13 g/l;
- Agente com formação de película como o azeite.



Figura 22. Agentes manchantes utilizados no ensaio da determinação da resistência às manchas.

Colocaram-se 3 a 4 gotas de cada agente manchante no provete da peça a ensaiar, sendo posteriormente colocado um vidro de relógio convexo de forma a espalhar as gotas num área aproximadamente circular, como se pode ver na figura 23.



Figura 23. Teste de resistência às manchas.

Os agentes manchantes foram deixados a atuar durante 24 horas. Após este período, as peças foram submetidas sucessivamente aos seguintes procedimentos de limpeza [29]:

- Procedimento A

Limpa-se o provete com água quente corrente durante 5 minutos e no final limpa-se a superfície com um pano húmido.

- Procedimento B

Limpa-se o provete com um agente de limpeza fraco (agente comercial, sem abrasivos, com pH entre 6,5 e 7,5), usando um tecido, não abrasivo, enxaguando a superfície com água corrente e limpando-a com um pano húmido.

- Procedimento C

Limpa-se o provete com o agente de limpeza forte (agente comercial, contendo abrasivos, com pH entre 9 e 10), neste trabalho foi utilizado lixívia, usando um esfregão, enxaguando a superfície com água corrente e limpando-a com um pano húmido.

- Procedimento D

Mergulha-se o provete durante 24 horas em acetona, depois enxagua-se a superfície com água corrente e enxuga-se com um pano húmido.

Após cada procedimento de limpeza, os provetes são secos na estufa e submetidos a uma avaliação visual a uma distância de 25 cm a 30 cm com uma iluminação natural ou artificial, evitando a radiação solar direta. Na avaliação visual os provetes podem ser classificados em 5 classes, como se pode ver na figura 24 [29].

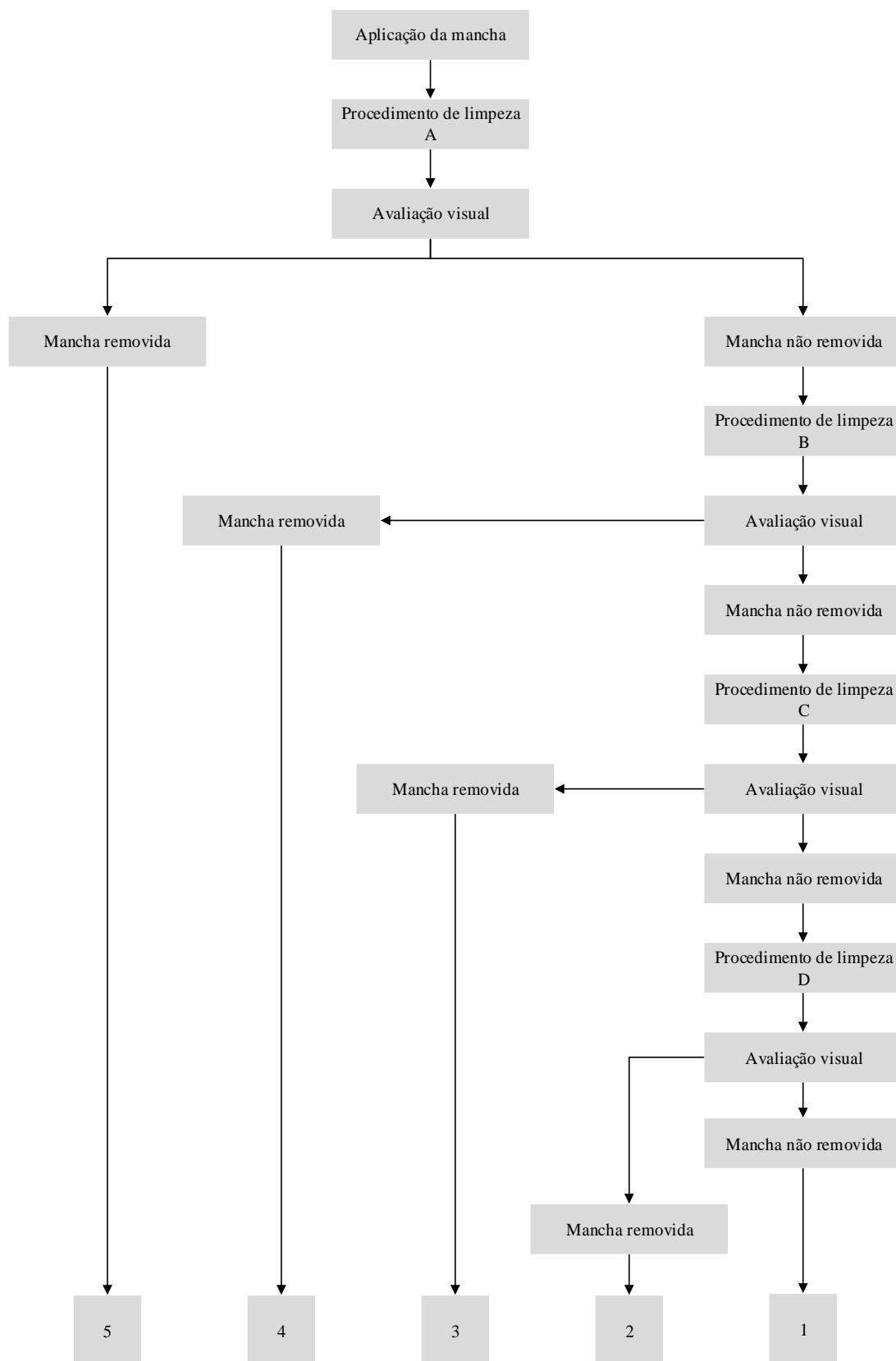


Figura 24. Classificação dos resultados do ensaio da resistência às manchas [29].

Os provetes são classificados de 1 a 5, de acordo com a remoção da mancha. Se a mancha for removida após o procedimento A o produto pertence à classe 5 que indica uma maior facilidade de remoção da mancha. A classe 4, 3, 2 indica que a mancha saiu após o procedimento B, C, D, respetivamente. A classe 1 indica a não remoção da mancha após todos os procedimentos.

2.2.3. Determinação da absorção de água, porosidade aparente e densidade

Para a determinação da absorção de água utilizou-se a norma ISO 10545-3 e a determinação da porosidade aparente e a densidade foi baseada no método de Arquimedes.

Para a realização destes ensaios foram utilizadas 12 amostras das 3 peças em estudo não polidas e polidas ao longo do processo de polimento.

Os provetes foram pesados em seco (P_0) e colocados em posição vertical dentro de uma panela com água em ebulição durante 2 horas, Após este tempo as amostras permaneceram dentro de água à temperatura ambiente a arrefecer. Posteriormente as amostras secas com pele de camurça e papel foram pesadas (P_1). Por último as amostras foram pesadas imersas em água (P_2).

A absorção de água representa a penetração de água nos poros abertos facilmente acessíveis enquanto a porosidade aparente é definida como a percentagem volumétrica de porosidade aberta existente nas amostras [30].

A percentagem de absorção de água, de porosidade aparente e o valor da densidade são calculadas da seguinte forma:

$$\% \text{ Absorção de água} = \frac{P_1 - P_0}{P_0} \times 100 \quad \text{Eq.4}$$

$$\% \text{ Porosidade aparente} = \frac{P_1 - P_0}{P_1 - P_2} \times 100 \quad \text{Eq.5}$$

$$\text{Densidade} = \frac{P_0}{P_1 - P_2} \quad \text{Eq.6}$$

em que:

P_0 =Peso das peças secas (g);

P_1 = Peso das peças húmidas (g);

P_2 = Peso das peças imersas em água (g).

2.2.4. Medição do brilho

Foram feitas 5 medições em cada peça dos três produtos em estudo, como mostra a figura 25 (à esquerda). As medições foram feitas em peças naturais e em peças polidas ao longo do processo de polimento, com o equipamento Horiba Gloss Checker IG-331 (figura 25 à direita), com um ângulo de incidência de 60° (figura 26).



Figura 25. Posições onde foram feitas as cinco medições de brilho nas peças (à esquerda) e medidor de brilho Horiba Gloss Checker IG-331, em que a superfície onde se calibra o instrumento está rodeada a vermelho (à direita).

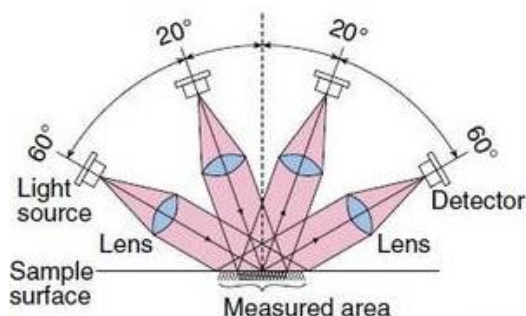


Figura 26. Sistema ótico do medidor de brilho Horiba Gloss Checker IG-331 [31].

A calibração é feita numa superfície preta (rodeada a vermelho na figura 25 à direita) com um valor de brilho de 90 para um ângulo de 60° .

A medição do brilho é feita segundo a reflexão do raio de luz que incide sobre a superfície e é determinado através da comparação da potência de luz refletida com o valor standard [31]. O standard usado para medir o brilho é um vidro com índice de refração de 1,567 que apresenta 100% de brilho para um ângulo de incidência de 60° tendo um

coeficiente de reflexão 10%. Se o ângulo de incidência for 20° o coeficiente de reflexão é de 5% para o mesmo vidro [31].

2.2.5. Medição da rugosidade

Para a medição da rugosidade das peças dos três produtos em estudo, o instrumento utilizado foi o Perthometer M1 da Mahr (figura 27 (a)). Trata-se de um rugosímetro de mostrador digital com apalpador mecânico.

O apalpador como se pode ver na figura 27 (b) é posicionado sobre a amostra e entra em contato com a superfície com uma velocidade de 0,5 mm/s e com um comprimento de leitura de 5,6 mm, para serem determinados os parâmetros R_a , R_z e R_{max} . O parâmetro R_a é o valor da rugosidade média, o R_z é o valor da rugosidade profunda e o R_{max} é o valor da profundidade máxima de rugosidade [32]. Foram feitas 10 medições em cada peça natural e polida ao longo do processo de polimento.

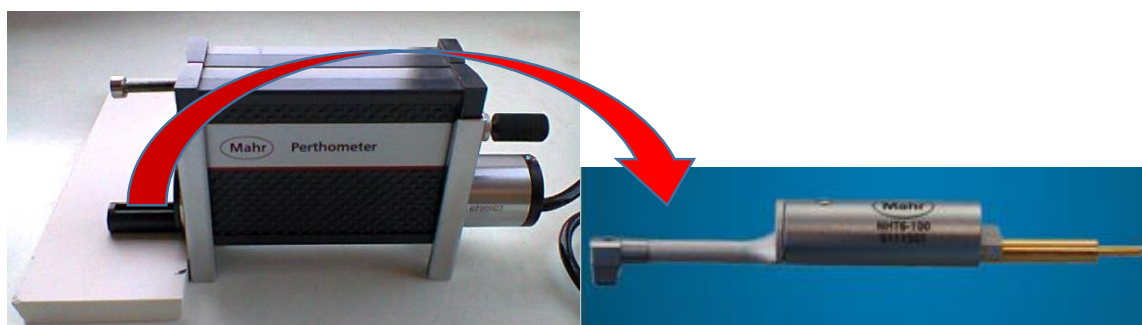


Figura 27. Medidor da rugosidade superficial (a) e apalpador que é posicionado sobre a amostra (b).

A rugosidade média (R_a), é a média aritmética dos desvios absolutos ($Z(x)$) no seu perfil em relação à linha média, dentro do percurso de medição, como se pode ver na figura 28.

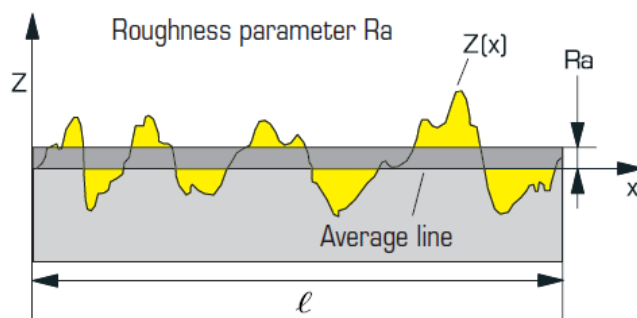


Figura 28. Valor da rugosidade média (Ra) [33].

A rugosidade profunda, Rz, representa a média aritmética determinada a partir da soma das medições feitas individualmente do ponto mais alto ao mais profundo dividindo pelo número de medições individuais (figura 29).

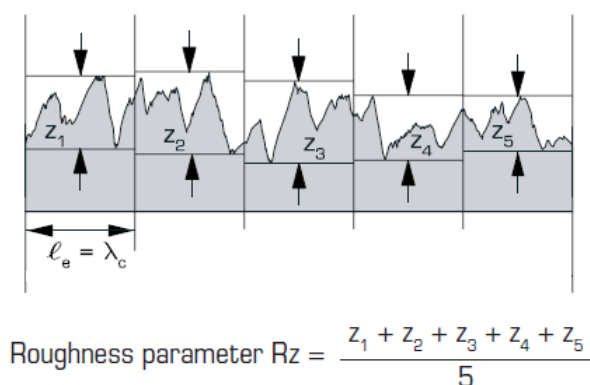


Figura 29. Determinação da rugosidade profunda (Rz) [33].

O Rmax é a profundidade máxima de rugosidade.

2.2.6. Determinação do módulo de rutura

Para a realização deste ensaio as peças com dimensão 60×60 cm foram cortadas em 30×60 cm. As peças com tamanho 30×60 cm foram posteriormente cortadas em 9 provetes com dimensões aproximadas de 5×15 cm.

Os provetes foram submetidos ao ensaio de resistência à flexão em três pontos utilizando o equipamento Shimadzu AG-X/R Refresh. A técnica de ensaio consiste em

apoiar o provete em dois pontos distanciados de um comprimento (D) e aplicar lentamente uma força de flexão no centro deste.

O módulo de rutura (N/mm^2) é calculado pela seguinte expressão:

$$\text{Módulo de rutura} = \frac{3 \times F \times D}{2 \times L \times e^2} \quad \text{Eq.7}$$

em que:

F- Carga de rutura do provete (N);

D- Distância entre apoios (mm);

L- Largura da peça (mm);

e- espessura da peça (mm).

2.2.7. Determinação da resistência à abrasão profunda para ladrilhos não vidrados

Este ensaio permite determinar a resistência à abrasão profunda das peças cromática superbranco e cromática ice naturais e polidas segundo a norma ISO 10545-6. O objetivo deste ensaio é determinar o volume de material removido (mm^3) com a medição do comprimento de incisão que foi provocada na superfície. Para isso é utilizado o aparelho de abrasão que consiste num disco rotativo, numa tremonha equipada com um dispositivo de regulação da queda do material abrasivo, um suporte para as amostras e um contrapeso (figura 30) [34].



Figura 30. Equipamento de abrasão profunda.

As 10 amostras de cada peça, naturais e polidas usadas neste ensaio foram colocadas, uma de cada vez no suporte, tangencialmente contra o disco rotativo feito de aço recozido com $200\pm0,2$ mm de diâmetro e $10\pm0,1$ mm de espessura. Este disco é feito girar 150 rotações tendo uma velocidade de rotação de 75 rpm. Como material abrasivo é utilizado coríndon (óxido de alumínio branco com grão F80 de acordo com a ISO 8486-1) que cai uniformemente na zona de desgaste com um débito de 100 ± 10 g/100 rotações, como se pode ver na figura 31 [34].



Figura 31. Ensaio à resistência à abrasão profunda.

Após 150 rotações do disco, as peças são retiradas e é medido o comprimento de corda L da incisão (em mm), com aproximação de 0,5 mm. Cada amostra é ensaiada em dois pontos perpendiculares entre si na superfície da amostra, como se pode ver na figura 32 [34].

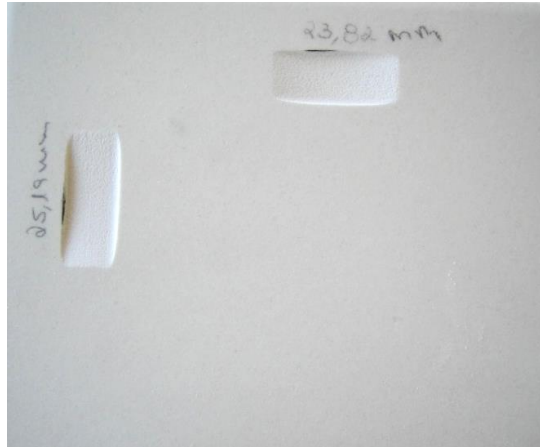


Figura 32. Comprimento da corda L de incisão (cm) em dois pontos perpendiculares na superfície.

A resistência à abrasão profunda define-se como sendo o volume (V) em mm³, de material extraído, que se calcula a partir da corda L da incisão, com a seguinte expressão [34]:

$$V = \left(\frac{\pi \times \alpha}{180} - \sin \alpha \right) \times \frac{h \times d^2}{8} \quad \text{Eq.8}$$

com:

$$\sin(0,5 \times \alpha) = L/d$$

em que:

α - Ângulo determinado pela corda no centro do disco rotativo (°) (figura 33);

h- Espessura do disco rotativo (mm);

d- Diâmetro do disco rotativo (mm);

L- Comprimento da corda (mm).

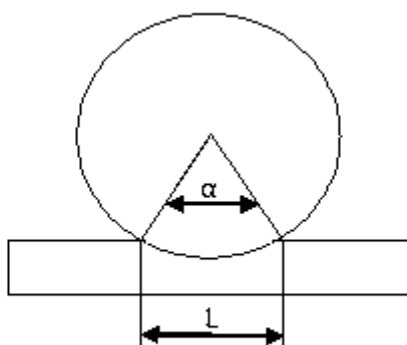


Figura 33. Determinação do ângulo no centro do disco rotativo de acordo com o comprimento da corda (mm).

Na norma ISO 10545-6 existe uma tabela com alguns valores equivalentes de L e V , não sendo necessário efetuar os cálculos da equação 8.

2.2.8. Determinação da resistência à abrasão superficial para ladrilhos vidrados

Este ensaio permite determinar a resistência à abrasão superficial das peças travertino silver naturais e polidas segundo a norma interna da empresa. Esta determinação é feita pela rotação de uma carga abrasiva sobre a superfície e avaliação do desgaste por comparação visual entre amostras ensaiadas e não ensaiadas e posterior classificação de acordo com a norma ISO 10545-7.

A carga abrasiva consiste em esferas de aço com variados diâmetros, coríndon (material abrasivo) e água, como se pode ver na tabela 7 [35].

Tabela 7. Carga abrasiva segundo a norma ISO 10545-7.

	Material	Quantidade
Esferas de aço	Diâmetro 5 mm	70 g
	Diâmetro 3 mm	52,5 g
	Diâmetro 2 mm	43,75 g
	Diâmetro 1 mm	8,75 g
	Coríndon F80	3 g
	Água	20 ml

O abrasímetro (figura 34) consiste num contentor de aço ligado a uma placa horizontal de suporte com posições para ensaio de amostras de dimensões 11×15 cm.



Figura 34. Abrasímetro.

A placa de suporte roda a 300 rpm com uma excentricidade de 22,5 mm para que a totalidade de cada provete de ensaio descreva um movimento circular de diâmetro 45 mm. As amostras são colocadas no aparelho por meio de fixadores metálicos de câmaras de abrasão, equipadas com vedantes de borracha. É colocado a câmara de abrasão sobre a superfície vidrada da amostra e introduzida a carga abrasiva dentro da câmara, como se pode ver na figura 35 [35].



Figura 35. Câmara de abrasão sobre a superfície vidrada da amostra.

Depois é selecionado o número de rotações no contador de abrasímetro e neste trabalho são 750, 900 e 1500 rpm. É utilizado uma amostra natural e polida para cada número de rotações. Após a abrasão, as amostras foram lavadas em água corrente e secas numa estufa. Depois foram comparadas visualmente com amostras do mesmo tipo que não sofreram abrasão, a uma distância de 2 m e de altura 1,65 m [35]. Com estes números de rotações as peças podem ser classificadas em PEI III e PEI IV segundo a norma ISO 10545-7. Se o desgaste for visível entre as 750-900 rotações a peça tem de classificação PEI III, mas se o desgaste for visível apenas entre as 900-1500 rotações a peça tem de classificação PEI IV. O PEI III é equivalente a um pavimento destinado a locais com tráfego moderado, já o PEI IV é equivalente a um pavimento destinado a locais com tráfego médio-forte.

2.2.9. Difração de Raios-X

As fases cristalinas dos produtos cromática superbranco, cromática ice e travertino silver sinterizados, foram determinadas por difração de raios-X, no aparelho Rigaku Geingerflex D/Max – Series, com radiação $K\alpha Cu$ ($\lambda = 1,5418$) e monocromatizada com filtro de níquel.

As amostras dos produtos em estudo foram ensaiadas com uma velocidade de passo de 3 °/min e com um ângulos de varrimento entre 4 e 80° (2θ). Os difratogramas foram identificados de acordo com a base de dados JCPDS (“Joint Committee for Diffraction Standards”).

Capítulo 3

Resultados e discussão

3. Resultados e discussão

Este capítulo descreve os resultados obtidos ao longo do trabalho que permitiram de uma forma sistemática detalhar o processo de polimento nos três produtos em análise:

- Caso de estudo 1: Cromática superbranco (grés porcelânico técnico)
- Caso de estudo 2: Cromática ice (grés porcelânico técnico)
- Caso de estudo 3: Travertino silver (grés porcelânico esmaltado)
- Caso de estudo 4: Polimento da cromática superbranco sem a etapa de calibração
- Caso de estudo 5: Polimento da cromática ice sem a etapa de calibração

3.1. Caso de estudo 1: Cromática superbranco

Os resultados obtidos de difração de raios-X do produto cromática superbranco sinterizado a 1215 °C, durante cerca de 60 minutos, estão apresentados na figura 36. Como seria de esperar as fases identificadas foram albite ((Na,Ca)Al(Si,Al)₃O₈), quartzo (SiO₂), coríndon (Al₂O₃), silicato de zircónia (ZrSiO₄) e mulite (Al₆Si₂O₁₃).

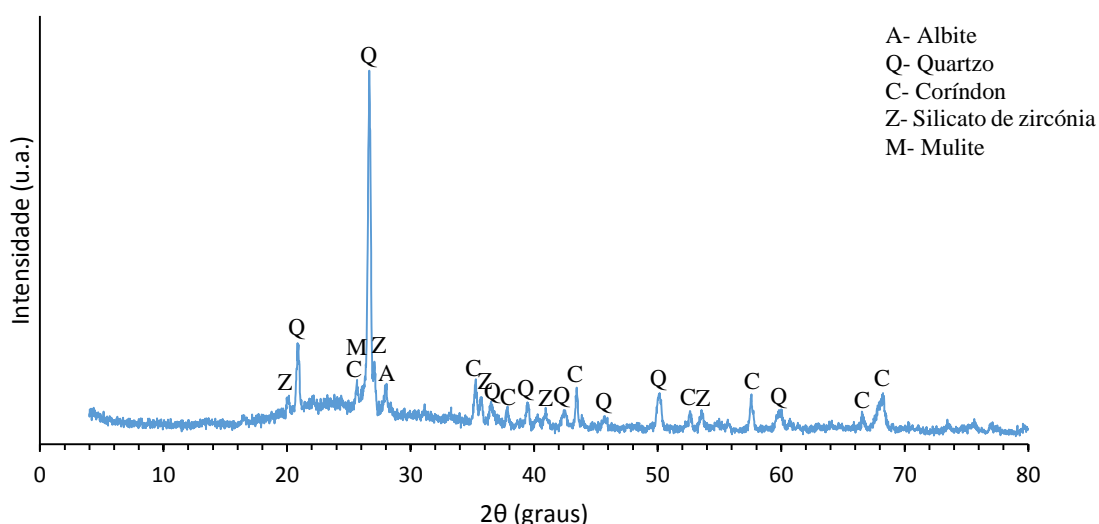


Figura 36. Difratograma e indicação das fases mineralógicas do produto cromática superbranco sinterizado a 1215 °C durante cerca de 60 minutos.

A figura 37 apresenta a micrografia de SEM (à esquerda) e o seu mapa de EDS (à direita). Pela análise da microestrutura verifica-se a presença de cristais embebidos na matriz vítrea. A partir do mapa de EDS verifica-se que os elementos Na, Al, Si, K, Ca, estão dispersos por toda a superfície.

Para quantificar a fase vítrea existente na superfície das peças, utilizou-se o programa *Image J* e calculou-se a percentagem média desta fase existente em 11 imagens de SEM. A percentagem média de fase vítrea é de 66,08±3,34%, sendo este valor apenas uma estimativa uma vez que os grãos estão sob a fase vítrea.

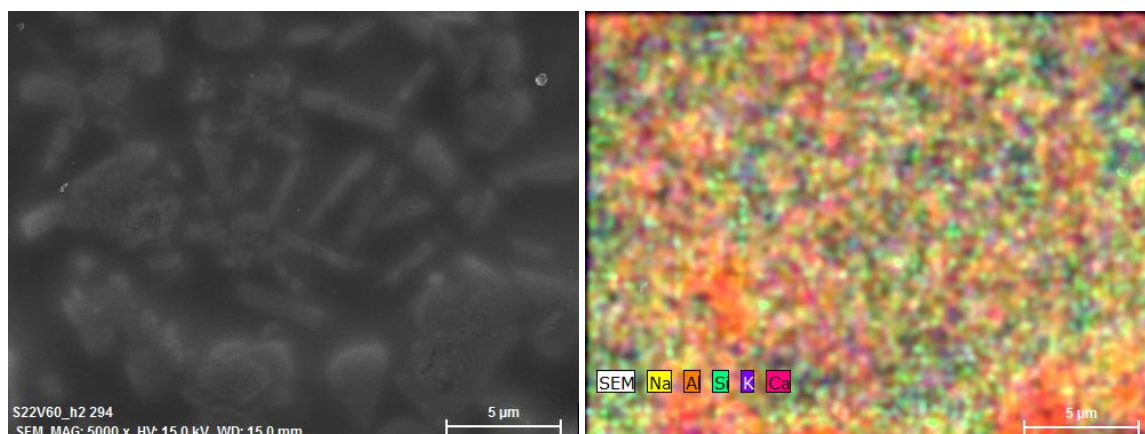


Figura 37. Microestrutura obtida por microscopia eletrônica de varrimento (SEM) (à esquerda) e mapa de EDS dessa mesma imagem (à direita).

As alterações que ocorrem na superfície das peças cromática superbranco ao longo do processo de polimento são (figura 38):

- **Não polido:**

A figura 38 (a) mostra uma micrografia obtida por SEM da superfície natural compacta. Na imagem (a₁) com maior ampliação, é possível ver os grãos assim como zonas completamente cobertas pela fase líquida.

- **Calibração:**

Na etapa de calibração (figura 38 (b), (b₁)) que tem como função nivelar a superfície da peça, é removida a camada compacta da superfície, provocando uma acentuada deterioração na superfície da peça, devido aos arrancamentos de material e da abertura de poros fechados, modificando completamente a superfície e tornando-a irregular.

- **1ª Máquina de polimento:**

Esta etapa, como se pode ver nas micrografias obtidas por SEM da figura 38 (c) e (c₁), teve a função de remover alguma rugosidade da superfície, tornando-a menos irregular. É visível a orientação dos riscos provocados pelos abrasivos e continuam a ser visíveis arrancamentos e poros abertos de vários tamanhos e formas.

- **2ª Máquina de polimento:**

Na última etapa deste processo, a superfície da peça (figura 38 (d), (d₁)), apresenta-se mais regular, mais lisa e sem riscos visíveis. Os arrancamentos e a porosidade aberta com diferentes morfologias e tamanhos continuam a ser visíveis na superfície, assim como defeitos (fissuras).

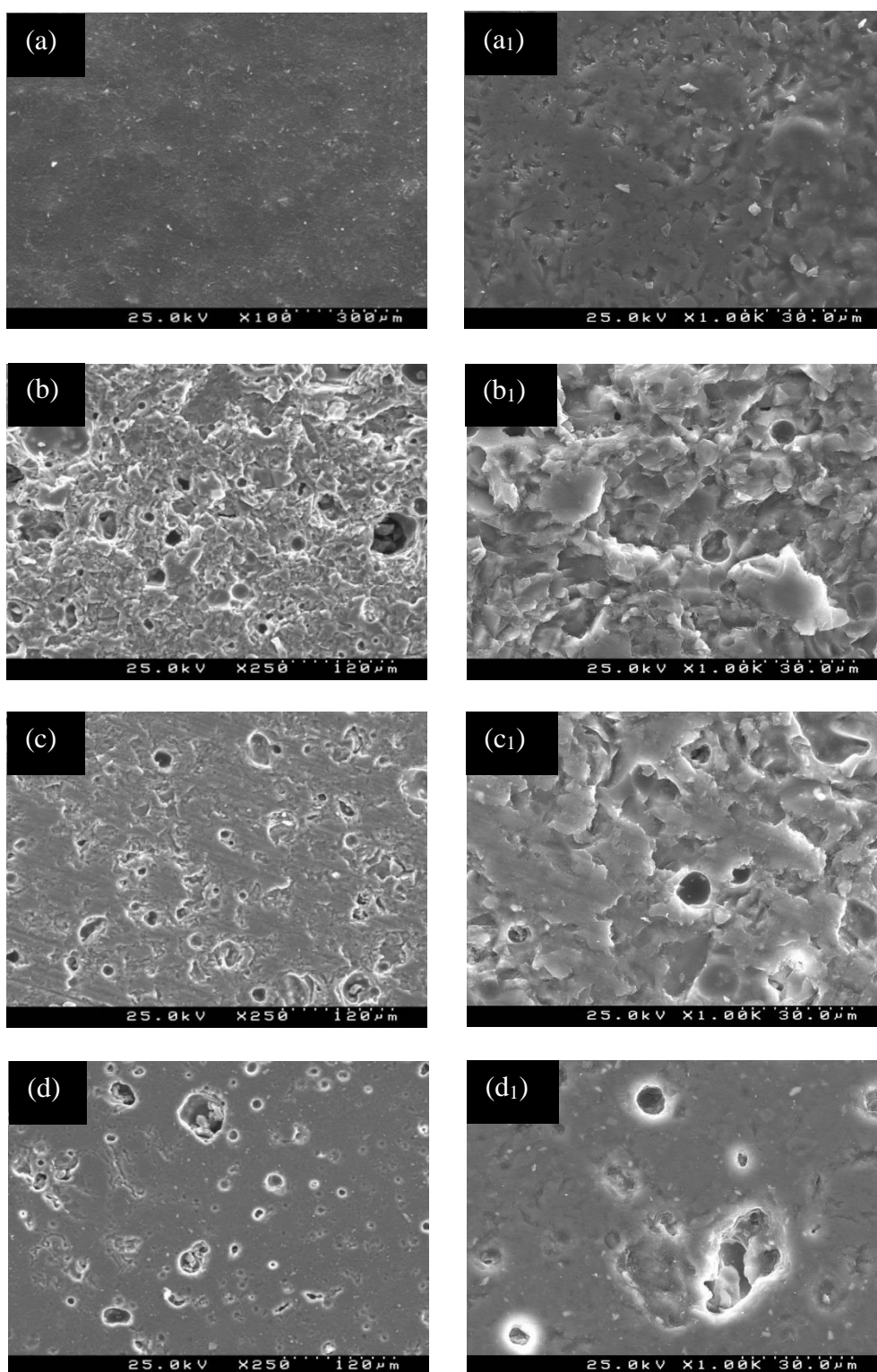


Figura 38. Micrografias obtidas por SEM da superfície da peça natural cromática superbranco (a, a₁), da superfície após a etapa de calibração (b, b₁), após passar na 1^a máquina de polimento (c, c₁) e após passar na 2^a máquina de polimento (d, d₁).

Na tabela 8, estão apresentados os resultados da caracterização da porosidade superficial e arrancamentos através da análise de 8 micrografias obtidas por SEM, realizada pelo programa *Image J*. Como podemos ver na tabela, ao longo das etapas do processo de polimento existe uma diminuição da área ocupada por poros e no diâmetro médio dos poros.

Tabela 8. Área ocupada por poros (%) e diâmetro médio dos poros (μm) do produto cromática superbranco polido ao longo do processo de polimento.

	Área ocupada por poros / área total da imagem (%)	Diâmetro médio dos poros (μm)
Etapas de calibração	$8,96 \pm 0,88$	$13,63 \pm 1,26$
1ª Máquina	$6,18 \pm 0,70$	$13,08 \pm 0,60$
2ª Máquina	$4,79 \pm 0,60$	$7,59 \pm 0,74$

De forma a conhecer a microestrutura interna do produto em estudo, foram obtidas imagens de SEM da secção transversal das peças naturais. Como se pode verificar na figura 39, existem inúmeros poros de vários tamanhos e formas.

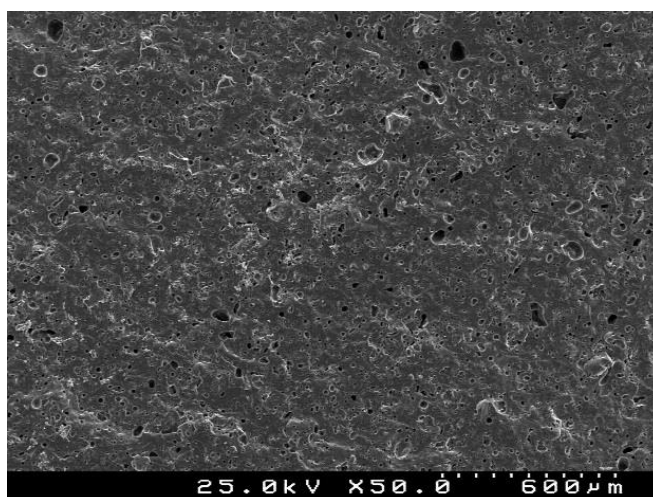


Figura 39. Micrografias da secção transversal da peça cromática superbranco natural.

No gráfico da figura 40 estão representados os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) da superfície das peças naturais e polidas ao longo do processo de polimento.

Analisando este gráfico, verifica-se que existe um aumento da Ra, Rz e Rmáx na etapa de calibração em comparação com a superfície natural. Como é uma etapa muito agressiva, torna a superfície bastante irregular com arrancamentos de material e poros abertos, como visto na figura 38. Com a etapa posterior, os três parâmetros diminuem consideravelmente, em relação à etapa anterior, uma vez que a superfície vai-se tornando menos irregular como vimos nas micrografias da figura 38. Os valores finais de Ra assim como os de Rz e de Rmáx atingem um valor ainda mais baixo, embora continuem a existir poros abertos e marcas dos arrancamentos de material.

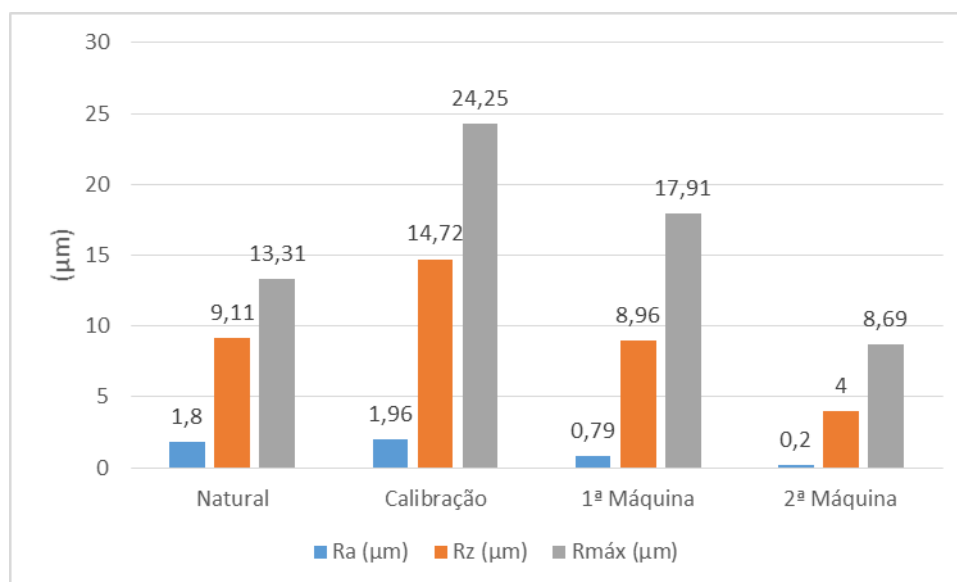


Figura 40. Gráfico com os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) da superfície das peças cromática superbranco naturais e polidas ao longo do processo de polimento.

Na tabela 9 apresentam-se os valores de brilho das peças naturais e polidas ao longo do processo de polimento. Como podemos constatar, o valor do brilho diminui nas duas primeiras etapas do processo de polimento relativamente ao valor do brilho na superfície natural, devido às irregularidades da superfície, aos arrancamentos existentes e devido também à porosidade aberta. Na última etapa a superfície da peça é polida com abrasivos

muito finos conferindo-lhe desta forma um grande aumento do brilho, sendo este valor também devido à rugosidade média ser mínima.

Tabela 9. Valores de brilho (%) na superfície da peça cromática superbranco natural e polida ao longo do processo de polimento.

	Intervalo de valores (%)	Média dos valores (%)
Natural	6-8	7,2
Calibração	5	5
1ª Máquina	4-5	4,8
2ª Máquina	52-56	54,8

Foi calculado a percentagem de absorção de água e da porosidade aparente, em peças naturais e polidas em cada etapa do processo de polimento. Constatou-se que não existem variações significativas mantendo-se estes valores nulos.

Foi também calculada a densidade das peças naturais da cromática superbranco sendo de 2,41.

O gráfico da figura 41 mostra os valores do módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura (N) obtidos em peças naturais e polidas ao longo do processo de polimento. Com a sua análise constata-se que o módulo de rutura diminui após a etapa de calibração. É nesta etapa que é removida a maior quantidade de material, e como é possível ver nas imagens de SEM da figura 38 são induzidos defeitos nas peças, pontos de fratura e os poros que eram fechados tornaram-se abertos.

Nas etapas seguintes os valores do módulo de rutura aumentam relativamente ao valor após a etapa de calibração, porque são removidos alguns defeitos e a superfície torna-se mais regular, como pode ser visto na figura 38.

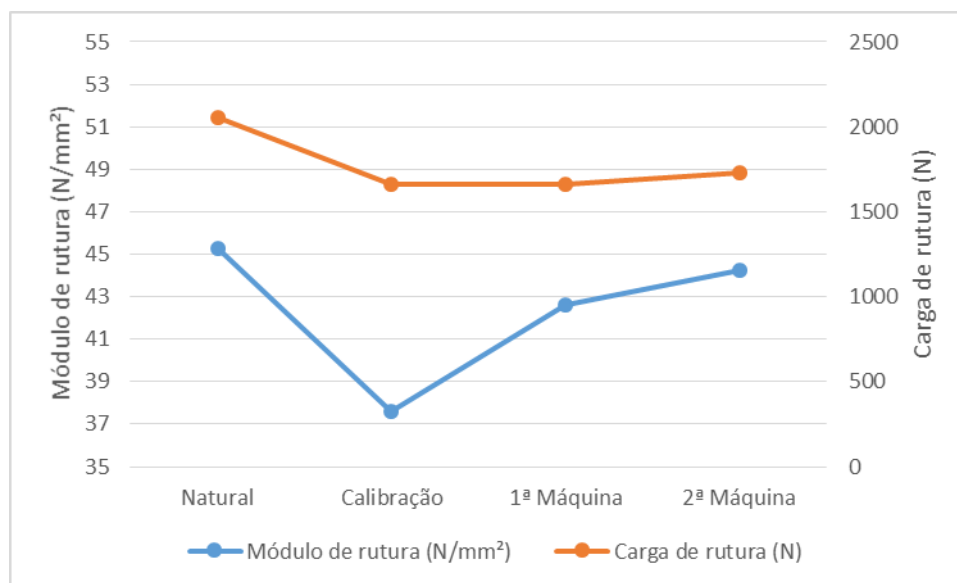


Figura 41. Gráfico com os valores do módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura (N) das peças cromática superbranco naturais e polidas ao longo do processo de polimento.

Realizou-se o ensaio de resistência à abrasão profunda em peças cromática superbranco naturais e polidas. Os valores do comprimento médio da corda L de incisão (mm) e o volume médio removido (mm^3) obtidos no ensaio, estão indicados na tabela 10. Como se pode ver na tabela, existe uma diferença da resistência à abrasão entre peças naturais e polidas. As peças polidas têm uma menor resistência à abrasão, tendo um comprimento da corda L de incisão 2,77 mm superior ao das peças naturais assim como um volume de material arrancado $46,4 \text{ mm}^3$ superior ao das peças naturais.

A resistência à abrasão depende da dureza da superfície, e a peça em estudo possui maioritariamente fases cristalinas como albite e quartzo que detêm uma dureza na escala de Mohs de 6 e 7 respetivamente. O material polido tem menor resistência porque possui porosidade superficial [36].

Tabela 10. Valores médios do comprimento da corda de incisão (mm) e do volume removido (mm^3) das peças cromática superbranco naturais e polidas.

		Comprimento médio da corda L de incisão (mm)	Volume médio removido (mm^3)
Cromática superbranco	Material natural	24,24	119,55
	Material polido	27,01	165,95

Na tabela 11 estão apresentados os resultados do ensaio de resistência às manchas em peças naturais e polidas ao longo do processo de polimento do produto em estudo.

Analisando a tabela observa-se que nas peças naturais as manchas são removidas mais facilmente, isto porque, possuem uma superfície mais densa.

Após a etapa de calibração, a superfície degrada-se devido aos arrancamentos de material e à abertura de porosidade fechada, o que tornam as peças menos resistentes às manchas. Embora as restantes etapas de polimento tornem a superfície mais regular, alguns defeitos como os arrancamentos e a porosidade aberta continuam a existir (figura 38), pelo que a superfície das peças continuam a ser menos resistentes às manchas em comparação com as peças naturais.

Relativamente aos agentes manchantes, as manchas de azeite são as mais fáceis de serem removidas em todas as peças, já as manchas de iodo no caso das peças polidas, são um pouco mais difíceis de serem removidas. No que diz respeito às manchas de óleo verde, estas são as mais difíceis, ou até mesmo, impossíveis de serem removidas após todos os processos de limpeza. A dificuldade em remover a mancha de óleo verde deve-se a este ter uma forte ação penetrante na superfície da peça.

Tabela 11. Classificação da remoção das manchas nas peças cromática superbranco naturais e polidas ao longo do processo de polimento.

	Azeite	Iodo	Óleo verde
Natural	5	5	5
Calibradora	4	2-1	1
1ª Máquina	4	2-1	1
2ª Máquina	4-5	2-1	1

3.2. Caso de estudo 2: Cromática ice

Na figura 42, apresenta-se os resultados obtidos de difração de raios-X do produto cromática ice sinterizado a 1215 °C, durante cerca de 60 minutos. Como seria de esperar as fases identificadas foram silicato de zircónia (ZrSiO_4), albite ($(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$), quartzo (SiO_2) e mulite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$).

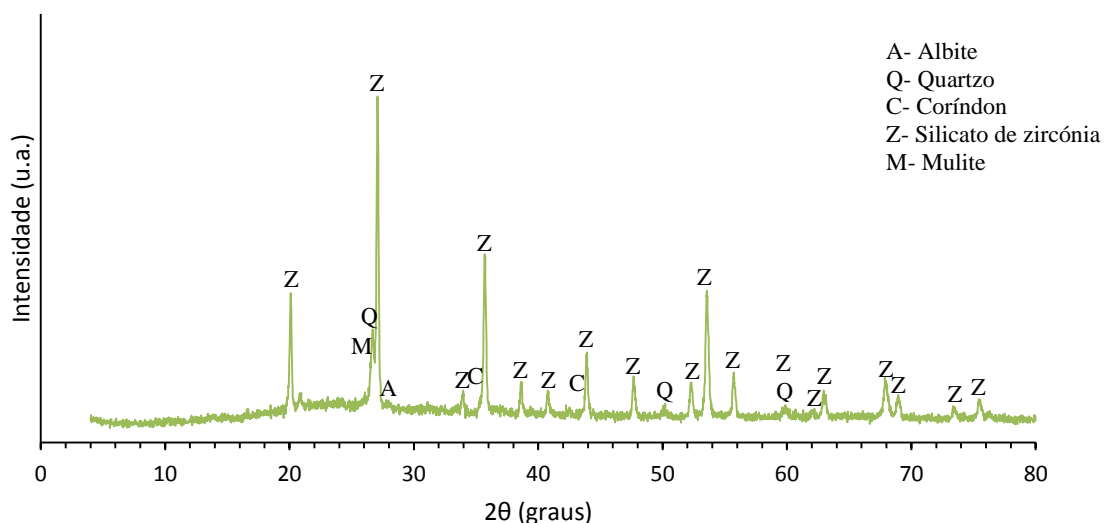


Figura 42. Difratograma e indicação das fases mineralógicas do produto cromática ice sinterizado a 1215 °C durante cerca de 60 minutos.

A figura 43 mostra a micrografia de SEM (à esquerda) e o seu mapa de EDS (à direita). Pela análise da microestrutura verifica-se a presença de cristais embebidos na matriz vítrea. A partir do mapa de EDS verifica-se que os elementos Na, Al, Si, Ca, Zr estão dispersos por toda a superfície, mas existem zonas em que os elementos estão bem evidenciados.

Neste produto não vai ser quantificada a fase vítrea, como mostra a figura 44 é difícil distinguir os cristais da fase vítrea.

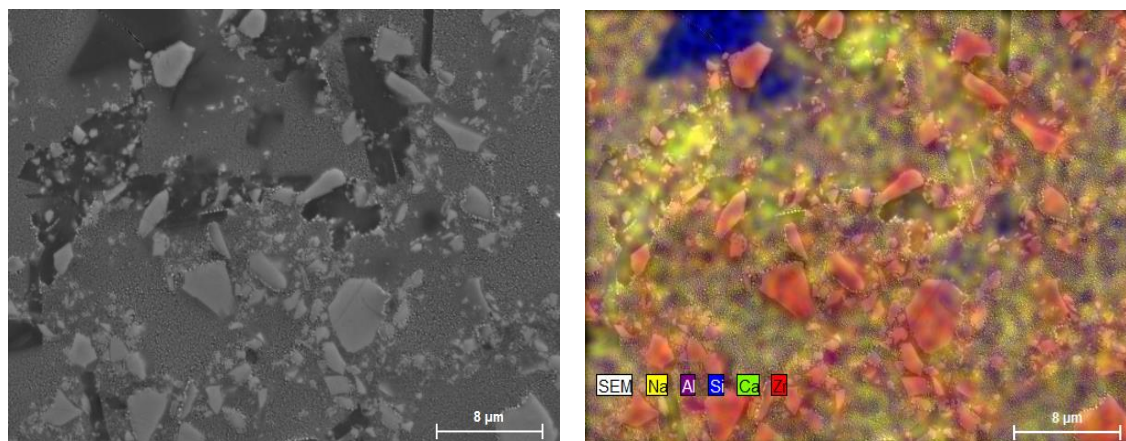


Figura 43. Microestrutura obtida por microscopia eletrônica de varrimento (SEM) (à esquerda) e mapa de EDS dessa mesma imagem (à direita).

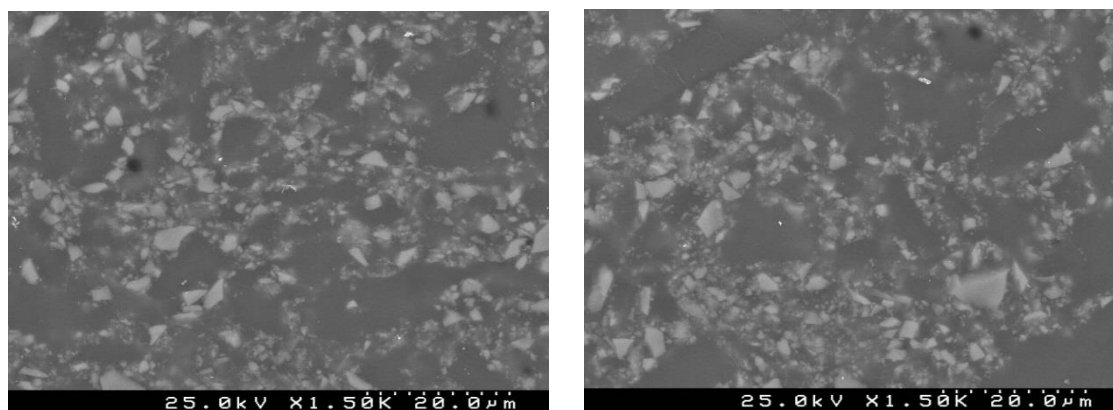


Figura 44. Micrografias obtidas por SEM da superfície do produto cromática ice.

As alterações que ocorrem na superfície das peças cromática ice ao longo do processo de polimento são (figura 45):

- **Não polido:**

A figura 45 (a) mostra uma micrografia obtida por SEM da superfície natural compacta. Na imagem (a₁) com maior ampliação, é possível ver os grãos assim como zonas completamente cobertas pela fase líquida.

- **Calibração:**

Na etapa de calibração (figura 45 (b), (b₁)) que tem como função nivelar a superfície da peça, é removida a camada compacta da superfície, ocorrendo arrancamentos de material

e abertura de poros fechados, o que provoca uma acentuada deterioração na superfície da peça, modificando-a completamente e tornando-a irregular.

- **1ª Máquina de polimento:**

Esta etapa, como se pode ver nas micrografias obtidas por SEM da figura 45 (c) e (c₁), teve a função de remover alguma rugosidade da superfície, tornando-a menos irregular. É visível a orientação dos riscos provocados pelos abrasivos e continuam a ser visíveis os arrancamentos e os poros abertos de vários tamanhos e formas.

- **2ª Máquina de polimento**

Na última etapa deste processo, a superfície da peça (figura 45 (d), (d₁)), apresenta-se mais regular, mais lisa e sem riscos visíveis. Os arrancamentos e a porosidade aberta com diferentes morfologias e tamanhos continuam a ser visíveis na superfície.

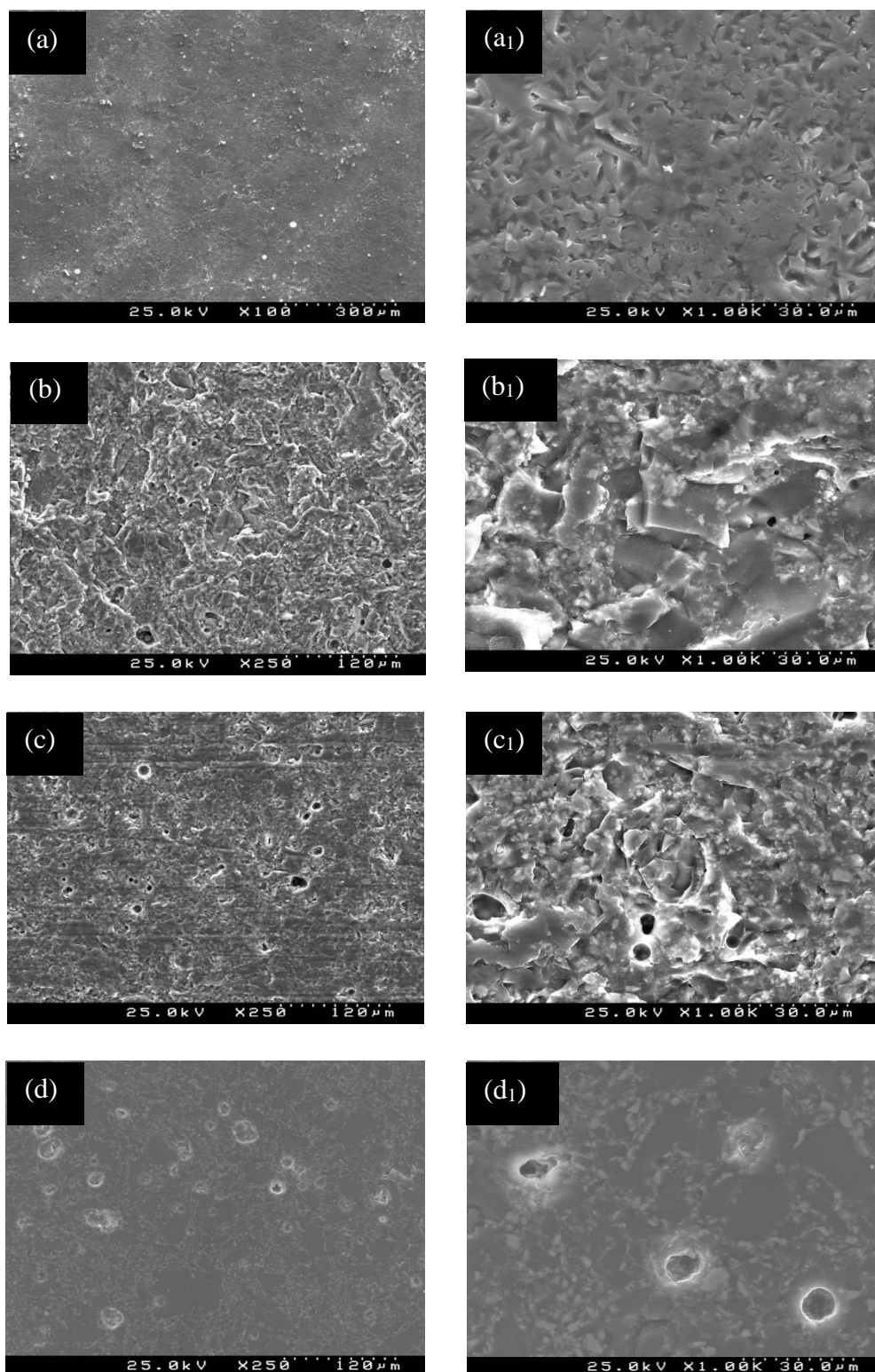


Figura 45. Micrografias obtidas por SEM da superfície da peça natural cromática ice (a, a₁), da superfície após a etapa de calibração (b, b₁), após passar na 1^a máquina de polimento (c, c₁) e após passar na 2^a máquina de polimento (d, d₁).

Na tabela 12 estão apresentados os resultados da caracterização da porosidade superficial e arrancamentos através da análise de micrografias realizada pelo programa *Image J*. Os valores observados na tabela correspondem a uma média aritmética de 8 imagens analisadas por etapa.

Com a análise da tabela 12, verificamos que no final do processo de polimento as peças apresentam um maior diâmetro médio dos poros que pode ser devido à junção de poros mais pequenos. Embora a superfície da peça se torne mais regular depois de passar pela segunda máquina de polimento alguns desníveis mantêm-se. Com o aumento do diâmetro médio dos poros a área ocupada por poros é maior.

Tabela 12. Área ocupada por poros (%) e diâmetro médio dos poros (μm) do produto cromática ice polido ao longo do processo de polimento.

	Área ocupada por poros / área total da imagem (%)	Diâmetro médio dos poros (μm)
Etapas de calibração	$0,63 \pm 0,10$	$4,58 \pm 0,80$
1ª Máquina	$1,23 \pm 0,27$	$4,50 \pm 0,68$
2ª Máquina	$4,01 \pm 1,61$	$11,39 \pm 2,33$

De forma a conhecer a microestrutura interna do produto em estudo, foram obtidas imagens de SEM da secção transversal das peças naturais. Como se pode verificar na figura 46, existem alguns poros de diversos tamanhos e maioritariamente esféricos.

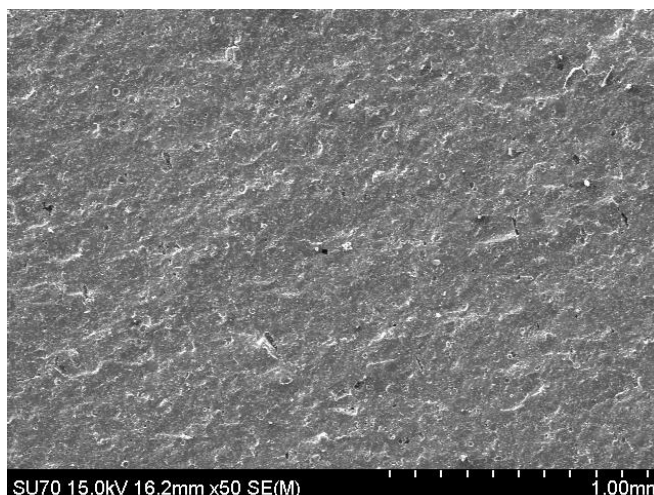


Figura 46. Micrografias da secção transversal da peça cromática ice natural.

No gráfico da figura 47 estão representados os valores da rugosidade média (R_a), da rugosidade profunda (R_z) e da profundidade máxima de rugosidade ($R_{máx}$) da superfície das peças naturais e polidas ao longo do processo de polimento.

Analisando este gráfico verifica-se que existe um aumento da R_a , R_z e $R_{máx}$ na etapa de calibração em comparação com a superfície natural. Como é uma etapa muito agressiva, torna a superfície bastante irregular com arrancamentos de material e poros abertos. Com a etapa posterior os três parâmetros diminuem consideravelmente, uma vez que a superfície vai-se tornando menos irregular como vimos nas micrografias da figura 45. Após a última etapa de polimento, os valores finais de R_a são muito próximos de zero porque embora a área ocupada por poros aumente (tabela 12), a superfície apresenta-se mais regular e mais lisa. Os valores de R_z e de $R_{máx}$ atingem um valor muito baixo comparado com os valores anteriores, embora continuem a existir poros abertos e marcas dos arrancamentos de material na superfície.

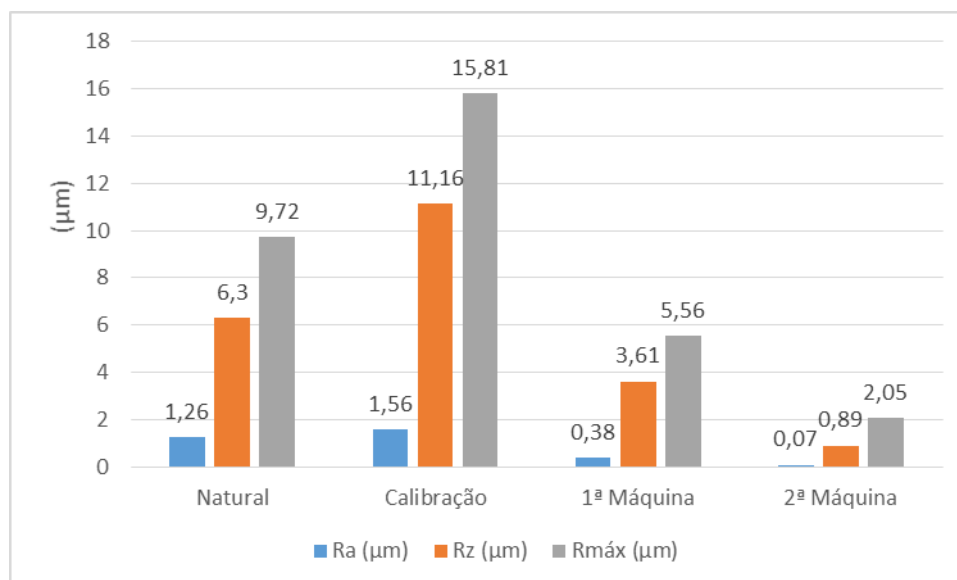


Figura 47. Gráfico com os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) da superfície das peças cromática ice natural e polidas ao longo do processo de polimento.

Os valores de brilho medidos em peças naturais e polidas ao longo do processo de polimento estão representado na tabela 13. Analisando a tabela, constata-se que o valor do brilho diminui nas duas primeiras etapas do processo de polimento relativamente à superfície natural, devido às irregularidades da superfície, aos arrancamentos existentes e à porosidade aberta. Na última etapa a superfície da peça é polida com abrasivos muito finos conferindo-lhe desta forma um grande aumento do valor do brilho, que também é devido à existência de uma da rugosidade média quase nula.

Tabela 13. Valores de brilho (%) na superfície da peça cromática ice natural e polida ao longo do processo de polimento.

	Intervalo de valores (%)	Média dos valores (%)
Natural	8-9	8,8
Calibração	2	2
1ª Máquina	5-8	7,4
2ª Máquina	73-79	77

Foi calculado a percentagem de absorção de água e da porosidade aparente, em peças naturais e polidas em cada etapa do processo de polimento. Os valores obtidos são nulos,

não se verificando variações significativas ao longo do processo. Foi também calculado a densidade das peças naturais da cromática ice sendo de 2,74.

Na figura 48 são exibidos os valores do módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura (N) das peças naturais e polidas ao longo do processo de polimento. Com a sua análise constata-se que o módulo de rutura diminui após a etapa de calibração devido à existência de defeitos, pontos de fratura e de poros abertos, como é possível ver nas imagens de SEM da figura 45. É nesta etapa que é removida a maior quantidade de material.

Nas etapas seguintes os valores do módulo de rutura aumentam relativamente ao valor após a etapa de calibração, porque são removidos alguns defeitos e a superfície torna-se mais regular, como pode ser visto na figura 45.

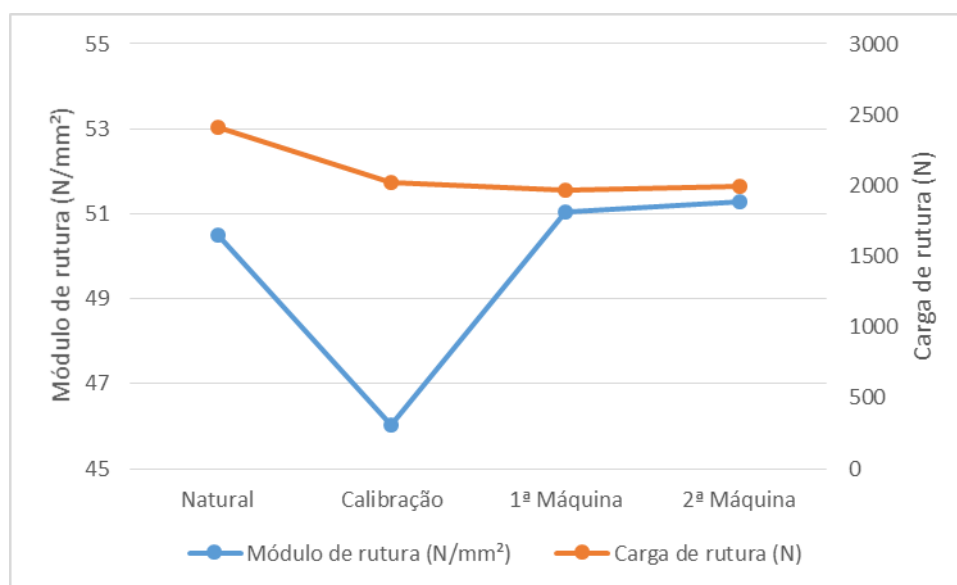


Figura 48. Valores do módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura (N) das peças cromática ice naturais e polidas ao longo do processo de polimento.

Com a realização do ensaio de resistência à abrasão profunda de peças cromática ice naturais e polidas, foram obtidos valores do comprimento médio da corda L de incisão (mm) e o volume médio removido (mm^3). Estes valores são apresentados na tabela 14. Como se pode ver na tabela existe uma diferença da resistência à abrasão entre peças naturais e polidas. As peças polidas têm uma menor resistência à abrasão tendo um comprimento da corda L de incisão 2,6 mm superior aos das peças naturais e um volume de material arrancado $41,65 \text{ mm}^3$ superior aos das peças naturais.

A resistência à abrasão depende da dureza da superfície, e a peça em estudo possui maioritariamente fases cristalinas como albite, quartzo e silicato de zircónia com uma dureza na escala de Mohs de 6,7 e 7,5 respetivamente. A existência de porosidade superficial provoca a diminuição da resistência à abrasão [36].

Tabela 14. Valores médios do comprimento da corda de incisão (mm) e do volume removido (mm³) das peças cromática ice naturais e polidas.

		Comprimento médio da corda L de incisão (mm)	Volume médio removido (mm ³)
Cromática ice	Material natural	23,21	105,95
	Material polido	25,81	147,6

Os resultados do ensaio de resistência à mancha em peças naturais e polidas ao longo do processo de polimento do produto cromática ice estão apresentados na tabela 15. Analisando a tabela observa-se que as manchas são removidas mais facilmente nas peças naturais, devido a estas possuírem uma superfície mais densa.

Após a etapa de calibração, as peças tornam-se menos resistentes às manchas por consequência da degradação da superfície devido aos arrancamentos de material e à abertura de porosidade fechada. Embora as restantes etapas de polimento tornem a superfície mais regular, os arrancamentos e a porosidade aberta continuam a existir, como é possível ver na figura 45, pelo que a superfície das peças continua a ser menos resistentes às manchas em comparação com as peças naturais.

No que diz respeito aos agentes manchantes, as manchas de azeite são as mais fáceis de serem removidas em todas as peças, já as manchas de iodo no caso das peças polidas, são um pouco mais difíceis de serem removidas. Relativamente às manchas de óleo verde, estas são as mais difíceis, ou até mesmo, impossíveis de serem removidas após todos os processos de limpeza. A dificuldade em remover esta mancha deve-se a este ter uma forte ação penetrante na superfície da peça.

Tabela 15. Classificação da remoção das manchas nas peças cromática ice naturais e polidas ao longo do processo de polimento.

	Azeite	Iodo	Óleo verde
Natural	5	4-5	5
Calibradora	4-5	1	2-1
1ª Máquina	4-5	2	1
2ª Máquina	5	2-3	1

3.3. Caso de estudo 3: Travertino silver

Na figura 49, apresenta-se os resultados obtidos de difração de raios- X do produto travertino silver sinterizado a 1210 °C, durante cerca de 60 minutos. As fases identificadas foram quartzo (SiO_2) e mulite ($\text{Al}_{4,68}\text{Si}_{1,32}\text{O}_{9,66}$).

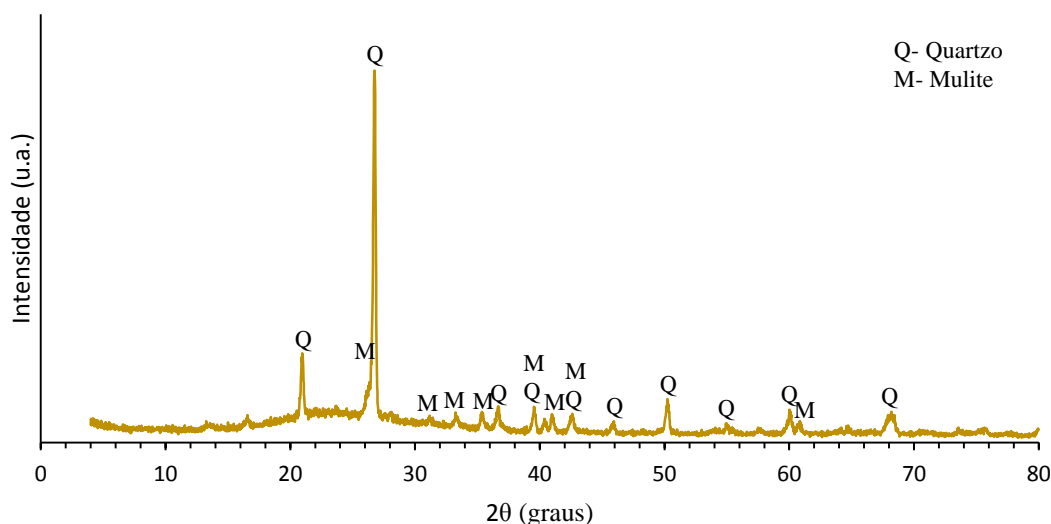


Figura 49. Difratograma e indicação das fases mineralógicas do produto travertino silver sinterizado a 1210 °C durante cerca de 60 minutos.

Na figura 50 apresenta-se a imagem SEM onde foi realizado o EDS pontual para identificar que elementos existem nos cristais. Pela análise do EDS pontual, os elementos maioritários são a sílica (Si), alumínio (Al) e o cálcio (Ca).

Os cristais podem ter sido formados a partir da cristalização da camada de granilha durante o ciclo térmico. Como estes também existem na camada de vidrado, pode-se também sugerir que a composição química do vidrado permitiu a nucleação e o crescimento destes cristais [10].

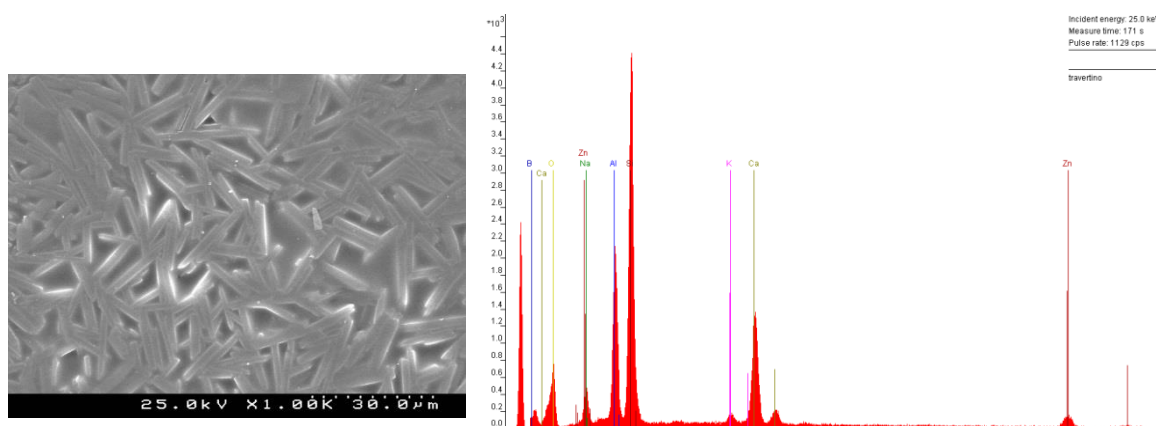


Figura 50. Imagem SEM (à esquerda) onde foi realizado o EDS pontual (à direita) para identificar elementos existentes nos cristais.

As peças travertino silver são peças esmaltadas, como já foi dito ao longo deste trabalho, e por isso os abrasivos que fazem o polimento nestas peças, não a desbastam para que esta fique plana. É desbastado o mínimo possível porque caso contrário retirava-se o esmalte.

As alterações que ocorrem na superfície da peça em estudo ao longo do processo de polimento são (figura 51):

- **Não polido:**

A figura 51 (a) mostra uma micrografia obtida por SEM da superfície esmaltada natural compacta. Esta superfície é muito irregular com zonas cristalizadas.

- **1ª Máquina de polimento:**

Após esta etapa a superfície torna-se menos irregular e ocorre o aparecimento de porosidade.

- **2ª Máquina de polimento:**

Na última etapa a superfície possui mais poros com variados tamanhos, mas na zona onde estes não existem, a superfície é mais lisa.

Os poros que surgem durante o polimento são devido à existência de porosidade fechada na camada da granilha. A porosidade fechada pode ser devido à acumulação dos gases que são libertados pelas matérias-primas que compõem o corpo cerâmico e ao vidrado não se decompor totalmente. Esta pode também depender da viscosidade, se esta for elevada os poros deixados pela libertação de gases não vão ser fechados [10, 37].

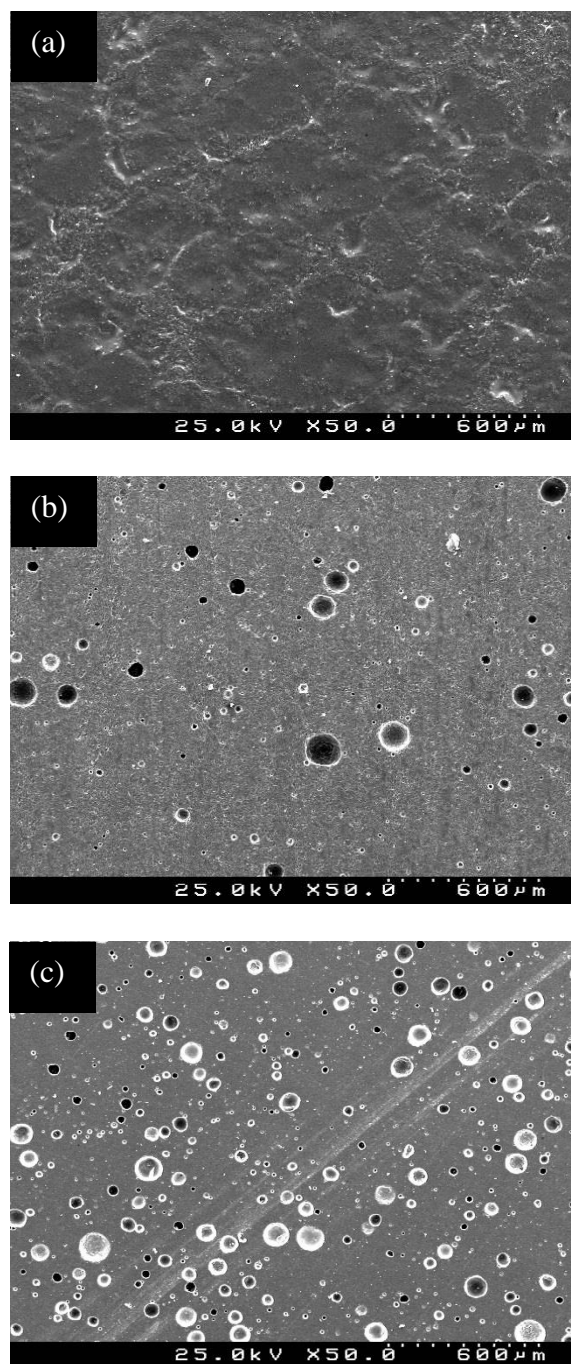


Figura 51. Micrografia obtida por SEM da superfície da peça natural travertino silver (a), da superfície após passar na 1ª máquina de polimento (b) e após passar na 2ª máquina de polimento (c).

Na tabela 16 estão apresentados os resultados da caracterização da porosidade superficial através da análise de micrografias obtidas por SEM realizada pelo programa *Image J*. Os valores observados na tabela correspondem a uma média aritmética de 8 imagens analisadas por etapa. Estes valores vão de encontro com o que foi dito anteriormente (figura 51), porque ao longo do processo de polimento ocorre um aumento da área ocupada por poros, uma vez que a sua quantidade aumenta assim como o diâmetro médio dos mesmos.

Tabela 16. Área ocupada por poros (%) e diâmetro médio dos poros (μm) do produto travertino silver polido ao longo do processo de polimento.

	Área ocupada por poros / área total da imagem (%)	Diâmetro médio dos poros (μm)
1ª Máquina	4,61 \pm 0,52	26,93 \pm 3,31
2ª Máquina	16,40 \pm 1,18	41,32 \pm 3,62

De forma a conhecer a microestrutura interna do produto em estudo, foram obtidas imagens de SEM da secção transversal das peças naturais. Como se pode verificar na figura 52, existem inúmeros poros de vários tamanhos e formas.

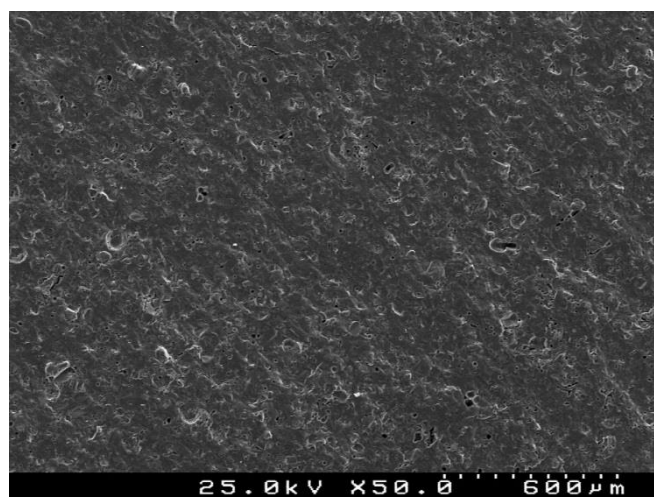


Figura 52. Micrografias da secção transversal da peça travertino silver natural.

No gráfico da figura 53 apresentam-se os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) da superfície das peças naturais e polidas ao longo do processo de polimento.

Pela análise do gráfico podemos ver que após a primeira etapa do polimento (1ª máquina) ocorre uma diminuição de Ra devido à superfície se encontrar mais regular. Contudo, é observado um aumento de Rz e Rmáx, devido ao aparecimento de alguns poros na superfície, tendo esta uma área ocupada por poros de $4,61 \pm 0,52\%$ (tabela 16).

Na última etapa (2ª máquina) os valores de Ra, assim como, de Rz e Rmáx aumentam devido ao aparecimento de mais porosidade na superfície tendo uma área ocupada por poros de $16,40 \pm 1,18\%$ (tabela 16).

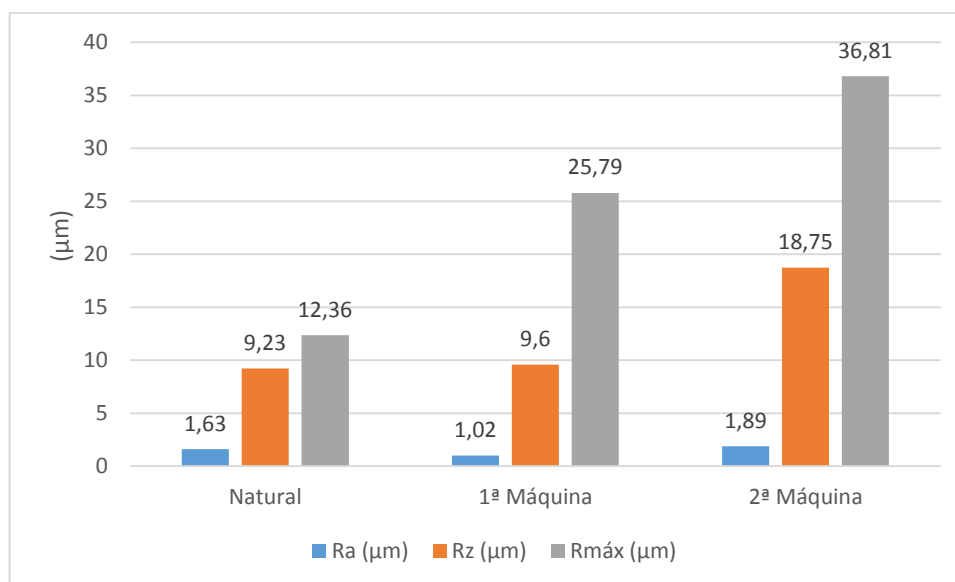


Figura 53. Gráfico com os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) da superfície das peças travertino silver natural e polidas ao longo do processo de polimento.

Os valores de brilho das peças travertino silver naturais e polidas ao longo do processo de polimento são apresentados na tabela 17. Comparando os valores de brilho das peças naturais com as polidas na 1ª máquina estes diminuem, mas com a última etapa o valor de brilho aumenta devido ao uso de grãos de abrasivos com menor tamanho ao longo da etapa (800 a 2000 µm).

Tabela 17. Valores de brilho (%) na superfície da peça travertino silver ao longo do processo de polimento.

	Intervalo de valores (%)	Média (%)
Natural	10-12	11,2
1ª Máquina	4-5	4,6
2ª Máquina	75-81	77,2

Os resultados da percentagem de absorção de água e da porosidade aparente, em peças naturais e polidas em cada etapa do processo de polimento são nulos, não se verificando variações significativas. A densidade das peças naturais do travertino silver é de 2,38.

Na figura 54 são apresentados os valores do módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura (N) das peças em estudo naturais e polidas ao longo do processo de polimento. Com a sua análise constata-se que os valores do módulo de rutura mantem-se próximos uma vez que o polimento não interfere com o substrato cerâmico.

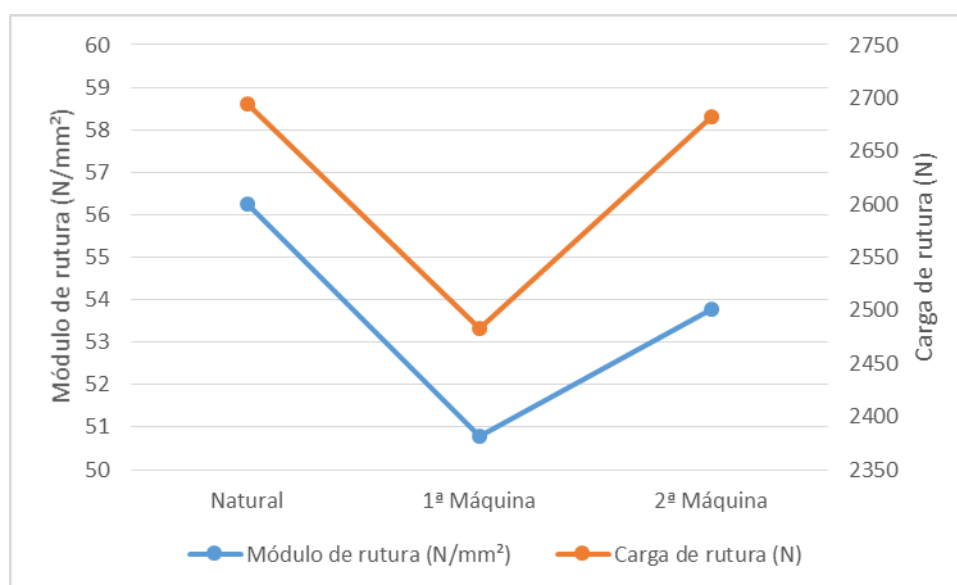


Figura 54. Valores do módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura das peças travertino silver naturais e polidas ao longo do processo de polimento.

Na figura 55 estão apresentadas as fotografias resultantes do ensaio de abrasão superficial nas peças naturais e polidas. No material natural (figura 55 (a)) não é observado nenhum desgaste da superfície sendo classificado como PEI IV (pavimento destinado a locais com tráfego médio-forte). No material polido, figura 55 (b), é observado desgaste na

superfície em todas as rotações sofridas. A classificação é feita com a peça que sofreu desgaste com o menor número de rotações (750 rpm), estando este classificado de PEI III (pavimento destinado a locais com tráfego moderado). Assim sendo, a resistência à abrasão das peças polidas é inferior à resistência à abrasão das peças não polidas. O que pode ser justificado pela remoção dos cristais na superfície e a existência de poros, o que diminui a sua resistência à abrasão [10].

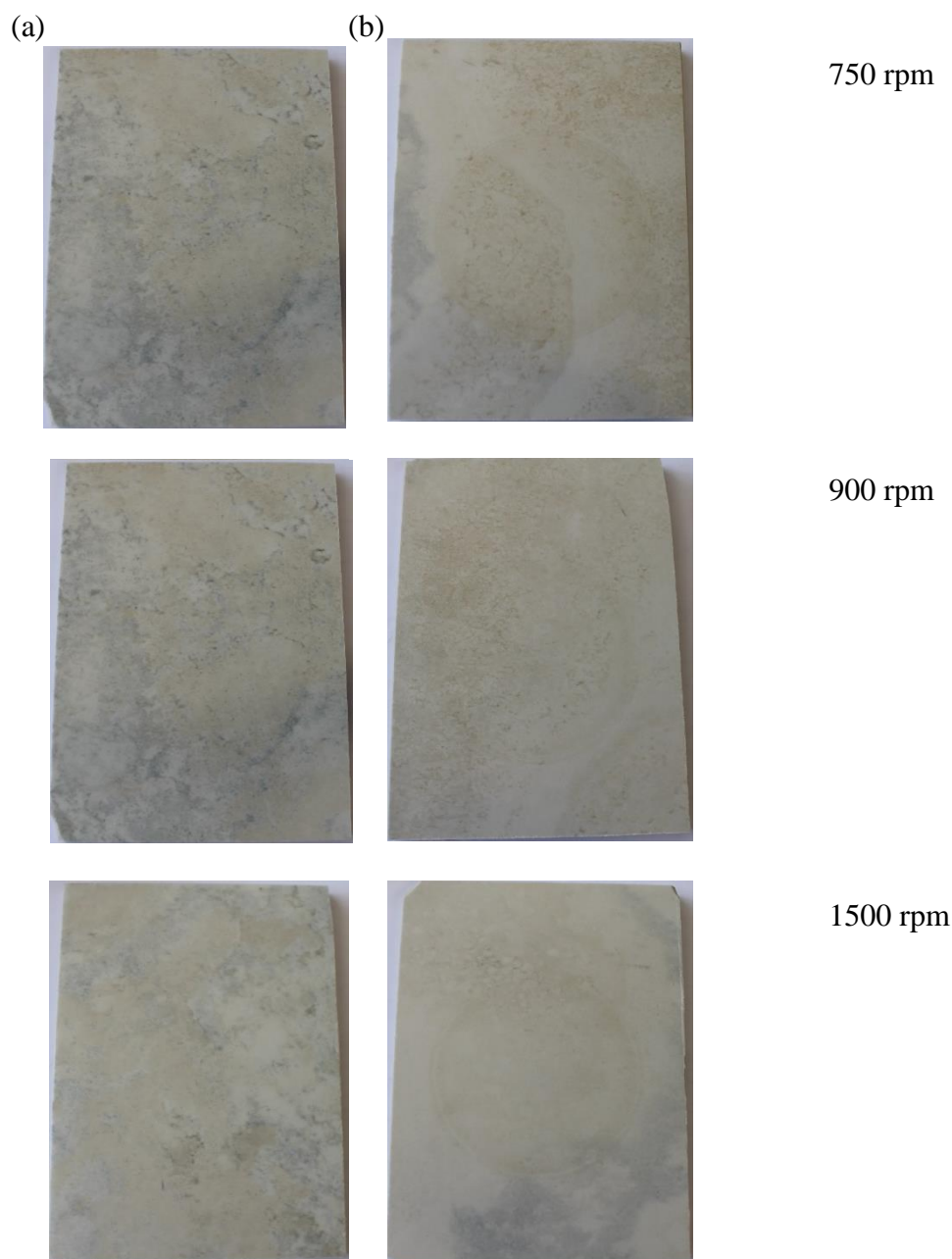


Figura 55. Fotografias dos resultados do ensaio de resistência à abrasão superficial das peças travertino silver naturais (a) e polidas (b) com 750, 900 e 1500 rpm.

Os resultados do ensaio de resistência às manchas nas peças de travertino silver são mostrados na tabela 18. Com a sua análise verificou-se que nas peças naturais as manchas são removidas mais facilmente, porque possuem uma superfície densa. Nas peças polidas ao longo do processo de polimento, as manchas de azeite e de iodo são facilmente removíveis, o que pode dever-se ao facto de os seus poros serem esféricos e com diâmetro médio superior

a 20 μm [8, 38]. A dificuldade em remover a mancha de óleo verde pode dever-se ao facto de este ter uma forte ação penetrante na superfície da peça.

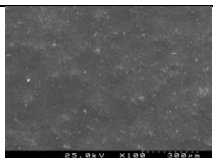
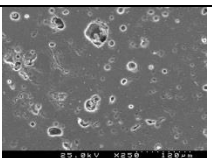
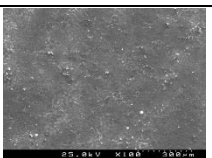
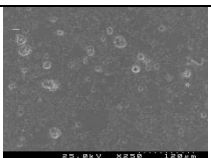
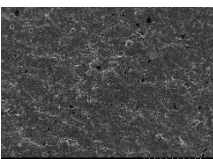
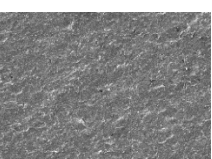
Tabela 18. Classificação da remoção das manchas nas peças travertino silver naturais e polidas ao longo do processo de polimento.

	Azeite	Iodo	Óleo verde
Natural	5	5	5
1ª Máquina	5	4	1
2ª Máquina	5	4-5	1

3.4. Ponto da situação

Na tabela 19 estão apresentados os resultados dos ensaios feitos nas superfícies naturais e polidas dos produtos cromática superbranco e cromática ice.

Tabela 19. Resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados nos produtos cromática superbranco e cromática ice naturais e polidos.

	Cromática superbranco		Cromática ice	
	Natural	Polido	Natural	Polido
Imagens de SEM da superfície				
Área ocupada por poros/ área total da imagem (%)		4,79±0,60	-	4,01±1,61
Diâmetro médio dos poros (µm)	-	7,59±0,74	-	11,39±2,33
Imagens de SEM da secção transversal		-		-
Rugosidade (µm)	Ra=1,80 Rz=9,11 Rmáx=13,31	Ra=0,20 Rz=4 Rmáx=8,69	Ra=1,26 Rz=6,30 Rmáx=9,72	Ra=0,07 Rz=0,89 Rmáx=2,05
Brilho (%)	7,2	54,8	8,8	77
Densidade	2,41	-	2,74	-

Caracterização e otimização do polimento de grés porcelânico

Módulo de rutura (N/mm ²)	45,28±0,89	44,27±1,51	50,49±2,07	51,29±2,22
Resistência à abrasão profunda (mm ³)	119,55	165,95	105,95	147,6
Resistência às manchas	↑	↓	↑	↓

Comparando os resultados obtidos nos ensaios realizados nas peças cromática superbranco e cromática ice naturais e polidas (apresentados na tabela 19) conclui-se que:

- A superfície densa tornou-se porosa, com arrancamentos e poros de diferentes morfologias e tamanhos;
- O valor de brilho aumentou e a rugosidade diminuiu, sendo estes os objetivos do polimento;
- Ocorre uma diminuição da resistência à abrasão profunda e da resistência às manchas;
- Relativamente aos resultados do módulo de rutura, estes não apresentam alterações assinaláveis.

A percentagem de área ocupada por poros nas duas peças é semelhante, mas como o diâmetro médio dos poros é inferior na peça cromática superbranco, esta possui maior quantidade de poros. Isto porque a cromática superbranco possui menor densidade, maior porosidade fechada (micrografia de SEM da secção transversal) e menor dureza. A razão para que a cromática ice deter maior densidade é devido a esta, conter mais silicato de zircónia.

Com base nestes resultados, verificou-se que a etapa de calibração do processo de polimento é muito agressiva e danifica fortemente a superfície dos produtos cromática superbranco e cromática ice. Assim, sugere-se que a alteração da etapa de polimento passe pela modificação da primeira fase. Neste contexto estudou-se o processo de polimento sem a primeira etapa.

3.5. Caso de estudo 4: Polimento da cromática superbranco sem a etapa de calibração

A figura 56 representa as micrografias obtidas por SEM das peças cromática superbranco polidas com todas as etapas do processo de polimento (a) e sem a etapa de calibração (b).

Como se pode ver ambas as micrografias possuem poros, arrancamentos de diferentes tamanhos e morfologias.

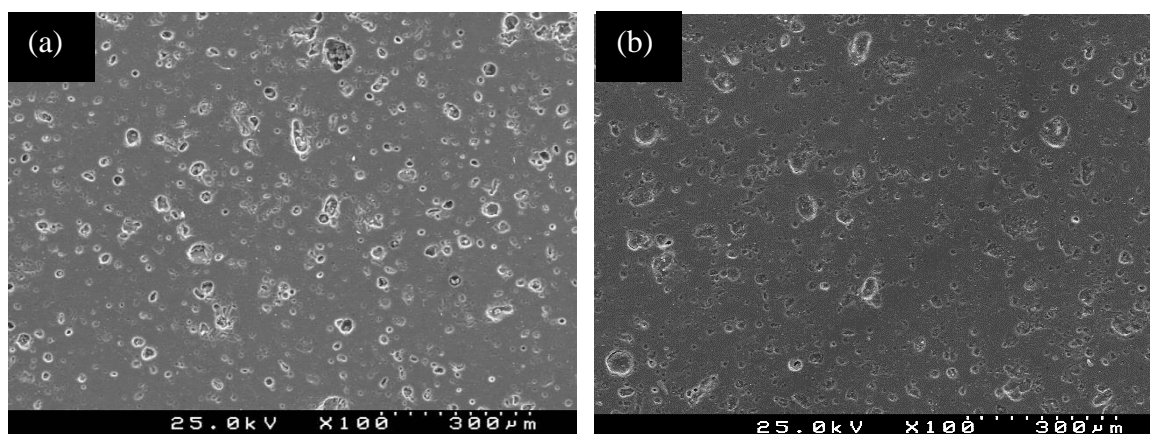


Figura 56. Micrografias obtidas por SEM das peças cromática superbranco polidas com todas as etapas do processo de polimento (a) e sem a etapa de calibração (b).

Na tabela 20, estão apresentados os resultados da caracterização da porosidade superficial, através da análise de micrografias obtidas por SEM, realizada pelo software *Image J*. Estes valores correspondem a uma média aritmética de 8 imagens.

Nesta tabela 20 está indicado a percentagem de poros que ocupam a área total da imagem e o diâmetro médio (μm) dos mesmos. Com a sua análise verificou-se que existe um aumento da área ocupada por poros, assim como no diâmetro médio dos poros comparando os valores do processo de polimento normal com o processo sem a etapa de calibração.

O aumento do diâmetro médio dos poros pode dever-se ao facto de quanto mais próximo da superfície, maior o diâmetro dos poros devido à etapa de prensagem [39]. Como as peças não passam pela etapa de calibração é removido menos quantidade de material.

Tabela 20. Área ocupada por poros (%) e diâmetro médio dos poros (μm) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.

	Área ocupada por poros / área total da imagem (%)	Diâmetro médio dos poros (μm)
Processo de polimento normal	4,79 \pm 0,60	7,59 \pm 0,74
Sem etapa de calibração	8,10 \pm 1,06	10,53 \pm 0,49

O gráfico da figura 57 apresenta os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) nas peças com e sem a etapa de calibração. Com análise do gráfico, verifica-se que não existe grande variedade nos três parâmetros, embora a área ocupada por poros (tabela 20) tenha aumentado nas peças que não passaram pela etapa de calibração.

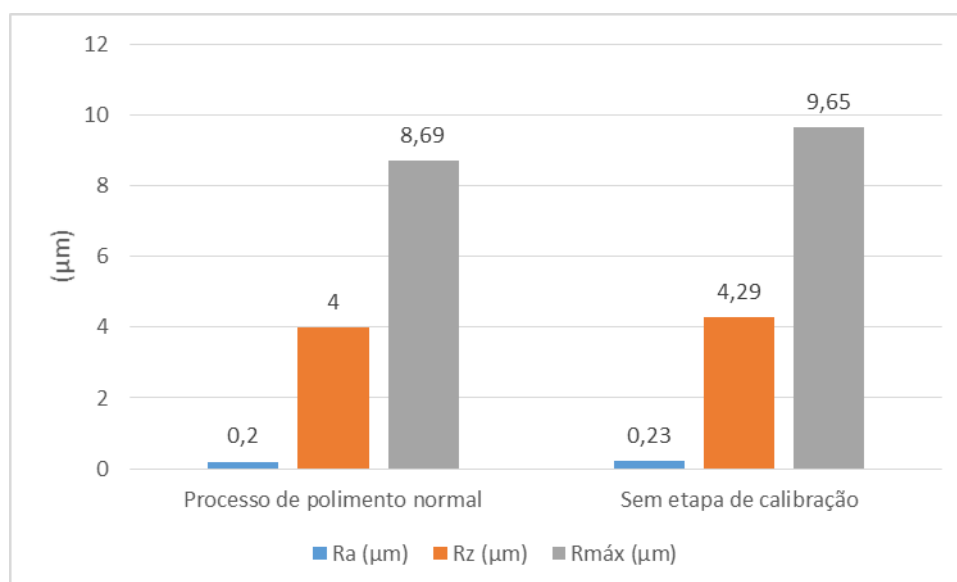


Figura 57. Gráfico com os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.

A nível de valores de brilho, as peças que não passaram pela etapa de calibração possuem menor percentagem de brilho, como se pode ver na tabela 21. Como a peça não foi nivelada existem zonas mais bem polidas que outras, assim como é possível observar riscos.

Tabela 21. Valores de brilho (%) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.

	Intervalo de valores (%)	Média (%)
Processo de polimento normal	52-56	54,8
Sem etapa de calibração	37-47	42,8

Relativamente aos valores de absorção de água e da porosidade aparente estes mantêm nulos nas peças polidas com e sem a etapa de calibração.

Na tabela 22, estão apresentados os resultados de módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura (N) das peças polidas ao longo de todas as etapas e sem a etapa de calibração. Como se verifica na tabela, os valores do módulo de rutura das peças cromática superbranco não alteram muito com ou sem a etapa de calibração.

Tabela 22. Valores do módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura (N) das peças cromática superbranco polidas com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.

	Módulo de rutura (N/mm^2)	Carga de rutura (N)
Processo de polimento normal	44,27 \pm 1,51	1728,24
Sem etapa de calibração	44,20 \pm 1,57	1515,38

No que diz respeito aos resultados do ensaio de resistência às manchas, apresentados na tabela 23, nota-se que mesmo sem a etapa de calibração os resultados são semelhantes. As manchas de azeite são as mais fáceis de serem removidas, já as de iodo e as de óleo verde são mais difíceis ou até mesmo impossíveis de serem eliminadas.

Tabela 23. Classificação da remoção das manchas no produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.

	Azeite	Iodo	Óleo verde
Processo de polimento normal	4-5	2-1	1
Sem etapa de calibração	4	1	1

3.6. Caso de estudo 5: Polimento da cromática ice sem a etapa de calibração

A figura 58 representa as micrografias obtidas por SEM das peças cromática ice polidas sem a etapa de calibração (b) e com todas as etapas do processo de polimento (a).

Como se pode ver, ambas as micrografias possuem poros, arrancamentos de diferentes tamanhos e morfologias, embora a figura 58 (b) pareça possuir menos quantidade de poros e arrancamentos.

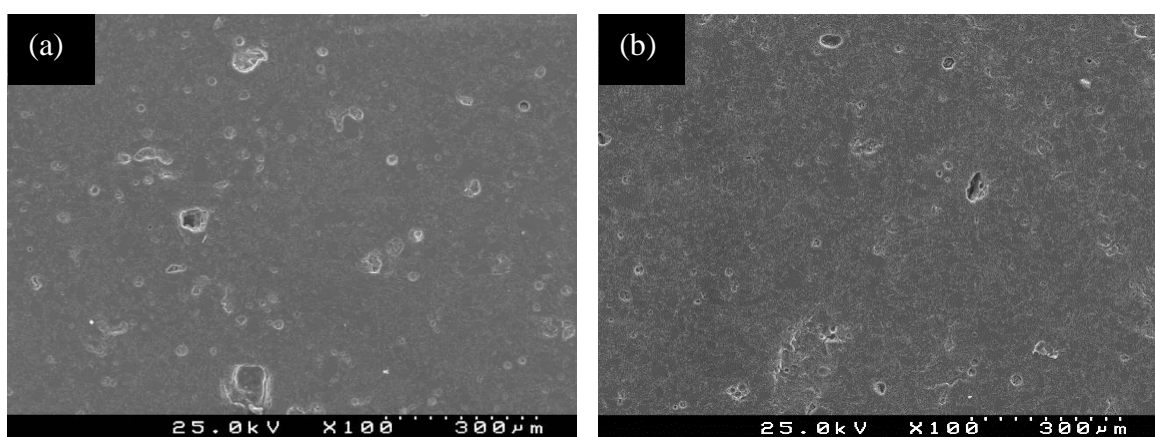


Figura 58. Micrografias obtidas por SEM das peças cromática ice polidas com todas as etapas do processo de polimento (a) e sem a etapa de calibração (b).

Na tabela 24, estão apresentados os resultados da caracterização da porosidade superficial, através da análise de micrografias obtidas por SEM, realizada pelo software *Image J*. Estes valores correspondem a uma média aritmética de 8 imagens analisadas por etapa.

Nesta tabela está indicado a percentagem de poros que ocupam a área total da imagem e o diâmetro médio (μm) dos mesmos. Com a sua análise verificou-se que existe uma diminuição da área ocupada por poros, assim como no diâmetro médio dos poros comparando os valores do processo de polimento normal com o processo sem a etapa de calibração. Estes valores vêm confirmar que a superfície da peça que não passou na etapa de calibração (figura 58 (b)) possui menos poros e arrancamentos.

Tabela 24. Área ocupada por poros (%) e diâmetro médio dos poros (μm) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.

	Área ocupada por poros / área total da imagem (%)	Diâmetro médio dos poros (μm)
Processo de polimento normal	$4,01 \pm 1,61$	$11,39 \pm 2,33$
Sem etapa de calibração	$2,59 \pm 0,60$	$9,38 \pm 0,77$

No gráfico da figura 59, estão representados os valores da rugosidade média (R_a), da rugosidade profunda (R_z) e da profundidade máxima de rugosidade ($R_{m\acute{a}x}$) medidos nas peças polidas com e sem a etapa de calibração.

Analisando este gráfico verifica-se, que a rugosidade média (R_a) é igual nos dois casos. A rugosidade profunda (R_z) aumenta ligeiramente e a profundidade máxima de rugosidade ($R_{m\acute{a}x}$) aumenta quase para o dobro. Como podemos ver na tabela 24, a superfície que foi polida sem a etapa de calibração tem menor percentagem de área ocupada por poros e um menor diâmetro médio dos poros. O aumento dos valores de R_z e $R_{m\acute{a}x}$ tem como justificação a existência de zonas mais bem polidas que outras e até mesmo zonas não polidas.

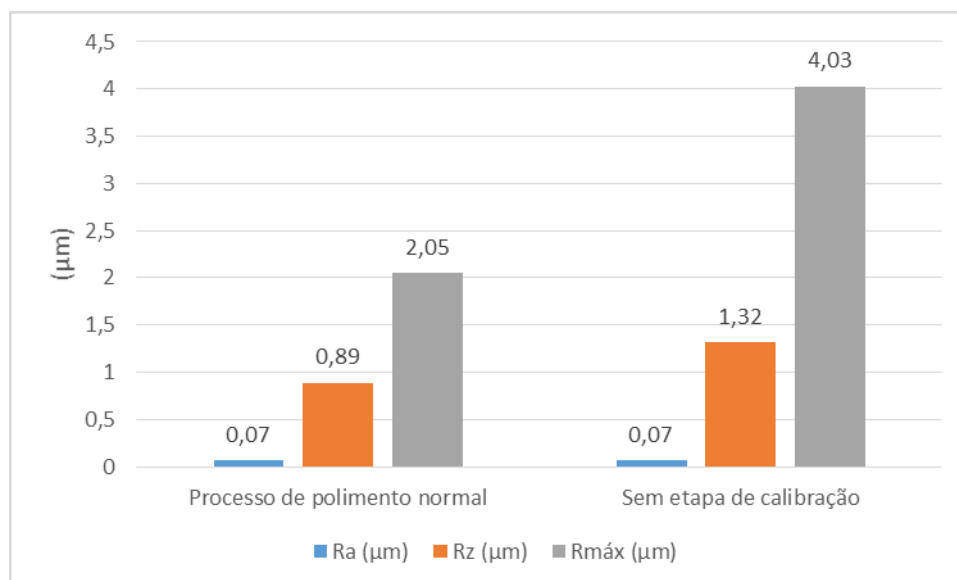


Figura 59. Gráfico com os valores da rugosidade média (Ra), da rugosidade profunda (Rz) e da profundidade máxima de rugosidade (Rmáx) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.

Na tabela 25, apresentam-se os valores de brilho medidos nas peças que passaram por todas as etapas do processo de polimento e as que não passaram pela etapa de calibração. As peças que não passaram pela etapa de calibração possuem menor percentagem de brilho em comparação com as peças que foram polidas pelo procedimento normal. Isto porque como a peça não foi nivelada existem zonas mais bem polidas que outras, assim como zonas não polidas e riscos.

Tabela 25. Valores de brilho (%) do produto polido com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.

	Intervalo de valores (%)	Média (%)
Processo de polimento normal	73-79	77
Sem etapa de calibração	49-81	70

Relativamente aos valores da percentagem de absorção de água e da porosidade aparente em peças polidas com e sem a etapa de calibração, não se verificou alterações significativas sendo os valores obtidos nulos.

Os resultados do módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura (N) das peças polidas ao longo de todas as etapas e sem a etapa de calibração estão apresentados na tabela 26. Como se verifica nesta tabela, os valores do módulo de rutura das peças cromática ice não alteram muito com ou sem a etapa de polimento.

Tabela 26. Valores do módulo de rutura (N/mm^2) e da carga de rutura (N) das peças cromática ice polidas com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.

	Módulo de rutura (N/mm^2)	Carga de rutura (N)
Processo de polimento normal	51,29±2,22	1996,42±94,36
Sem etapa de calibração	48,49±1,56	2161,53±75,26

No que diz respeito aos resultados do ensaio de resistência às manchas, apresentados na tabela 27, nota-se que mesmo sem a etapa de calibração os resultados mantêm-se semelhantes. As manchas de azeite são facilmente removidas, as de iodo são um pouco mais difíceis de serem removidas e as de óleo verde são impossíveis de serem eliminadas.

Tabela 27. Classificação da remoção das manchas no produto polido cromática ice com todas as etapas do processo de polimento e sem a etapa de calibração.

	Azeite	Iodo	Óleo verde
Processo de polimento normal	5	2-3	1
Sem etapa de calibração	5	2	1

Capítulo 4

Conclusão

4. Conclusão

As conclusões do trabalho são:

1. Existe a necessidade de fazer polimento nas peças cerâmicas para conferir-lhes um acabamento semelhante às pedras naturais.
2. O polimento que é efetuado na Revigrés às peças de grés porcelânico técnico consiste num processo sequencial de etapas, que começam com uma abrasão drástica na superfície que remove cerca de 0,5 mm de espessura da peça seguida de duas etapas de polimento da superfície danificada.
3. Como as peças de grés porcelânico possuem alguma porosidade residual e uma grande quantidade de fase líquida (40 a 75% em peso [11]) a primeira fase do polimento causa uma degradação considerável na superfície da peça. No caso do produto cromática superbranco, esta deterioração é acompanhada de arrancamentos de grãos embebidos na matriz vítrea e porosidade aberta que originam um aumento da rugosidade média (aumento de 0,16 μm), uma diminuição do brilho atingindo-se valores mínimos (5%), os valores de absorção de água e porosidade aparente mantêm-se nulos, ocorre uma queda nos valores do módulo de rutura (diminuem 7,65 N/mm^2) e diminuição da resistência às manchas principalmente para os agentes manchantes iodo e óleo verde, que da classificação máxima (5) passa para classificações mais baixas (2, 1). No caso do produto cromática ice é visível um aumento da rugosidade média (aumento de 0,3 μm), uma diminuição do brilho atingindo-se valores mínimos (2%), os valores de absorção de água e porosidade aparente mantêm-se nulos, observa-se uma queda nos valores do módulo de rutura (diminuem 4,46 N/mm^2) e diminuição da resistência às manchas principalmente para os agentes manchantes iodo e óleo verde, que da classificação máxima (5) passa para classificações mais baixas (3 a 1).
4. Os defeitos criados pela etapa de calibração na superfície nunca mais são recuperados.
5. Esta danificação da superfície depende, para o mesmo tratamento, da natureza do corpo cerâmico; ou seja, se a densidade e dureza forem elevadas, a resistência mecânica é superior e por consequência menores são os danos produzidos na

primeira etapa. Como reportado anteriormente o produto cromática ice possui uma densidade de 2,74 e maior resistência à abrasão profunda em comparação com o produto cromática superbranco, que tem uma densidade de 2,41.

6. No produto cromática superbranco a eliminação da primeira etapa de polimento provoca um aumento da área ocupada por poros e do diâmetro médio dos mesmos. Relativamente aos ensaios realizados, os resultados da absorção de água, da porosidade aparente, da rugosidade, da resistência às manchas e do módulo de rutura mantêm-se. No entanto o aspeto estético diminui, porque existem na peça zonas mais polidas que outras assim e riscos. O valor de brilho é inferior 12%.
7. Com a eliminação da etapa inicial no produto cromática ice, obteve -se uma diminuição da área ocupada por poros e do diâmetro médio dos mesmos. Porém, nos resultados dos ensaios da absorção de água, da porosidade aparente, da rugosidade, da resistência às manchas e do módulo de rutura não ocorreu mudanças significativas. No entanto o aspeto estético diminui porque na peça existem zonas mais polidas e outras menos polidas, riscos, assim como uma diminuição de 7% do valor de brilho.

5. Sugestões

A eliminação da etapa inicial mostrou que as propriedades dos produtos não alteram significativamente, assim é sugerido neste trabalho:

1. Que se adapte a etapa de polimento inicial a cada produto e que se diminua a intensidade da abrasão, de forma a não danificar tanto a superfície;
2. Se elimine a etapa de calibração e se adapte as restantes etapas para melhorar as propriedades estéticas das peças.

Referências bibliográficas

1. www.revigres.pt. acedido a 8/07/2013.
2. Oliveira, A.P.N., *Grês Porcelanato: Aspectos Mercadológicos e Tecnológicos*. Cerâmica Industrial, 1998. **3**(3): p. 34-41.
3. Menegazzo, A.P.M., et al., *Grês Porcelanato. Parte I: Uma Abordagem Mercadológica*. Cerâmica Industrial, 2000. **5**(5).
4. Sánchez, E., *Considerações Técnicas sobre Produtos de Revestimento Porcelânico e seus Processos de Manufatura. Parte I*. Cerâmica Industrial, 2003. **8**(2): p. 7-16.
5. *Apontamentos das aulas de Tecnologia Cerâmica.*, in Universidade de Aveiro. 2012/2013.
6. Rosso, J., E.S. Cunha, and R.A. Rojas-Ramírez, *Características Técnicas e Polimento de Porcellanatos*. Cerâmica Industrial, 2005. **10**(4): p. 11-14.
7. De Noni, A., et al., *Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part I: Microstructural characterization and developed phases after firing*. Materials Science and Engineering: A, 2010. **527**(7-8): p. 1730-1735.
8. Heck, C., *Gres Porcelanato*. Cerâmica Industrial, 1996. **1**(4/5): p. 21-24.
9. Oliveira, H.J. and J.A. Labrincha, *Esmaltes e Engobes para Monoporosa*. Cerâmica Industrial, 2002. **7**(2): p. 25-29.
10. Sarabando, A.R.M., *Uso de granilhas em suspensão para grés porcelânico*, in Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro. 2011, Universidade de Aveiro. p. 1-65.
11. Zanelli, C., et al., *The vitreous phase of porcelain stoneware: Composition, evolution during sintering and physical properties*. Journal of Non-Crystalline Solids, 2011. **357**(16-17): p. 3251-3260.
12. Rodriguez, A.M., et al., *Propriedades de Matérias-primas Seleccionadas para a Produção de Grês Porcelanato*. Cerâmica Industrial, 2004. **9**(1): p. 33-38.
13. Baptista, J.L. and D.B. Lucas, *Introdução à ciência e tecnologia dos materiais cerâmicos*.
14. Lassinantti Gualtieri, M., M. Romagnoli, and A.F. Gualtieri, *Influence of body composition on the technological properties and mineralogy of stoneware: A DOE and mineralogical-microstructural study*. Journal of the European Ceramic Society, 2011. **31**(5): p. 673-685.
15. Leonelli, C., et al., *Enhancing the mechanical properties of porcelain stoneware tiles: a microstructural approach*. Journal of the European Ceramic Society, 2001. **21**: p. 785-793.
16. Ptáček, P., et al., *The kinetics of Al-Si spinel phase crystallization from calcined kaolin*. Journal of Solid State Chemistry, 2010. **183**: p. 2565-2569.
17. Sánchez, E., et al., *Polishing Porcelain Tile. Part 2: Influence of Microstructure and Microhardness*. American Ceramic Society Bulletin, 2002. **81**: p. 57-61.
18. Vogel, W., *Chemistry of glass*, ed. O.T.A.C.S. Inc. 1985.
19. Hutchings, I.M., et al., *Porcelain tile microstructure: implications for polishability*. Journal of the European Ceramic Society, 2006. **26**(6): p. 1035-1042.
20. Sánchez, E., et al., *Porcelain tile microstructure: Implications for polished tile properties*. Journal of the European Ceramic Society, 2006. **26**(13): p. 2533-2540.
21. Sánchez, E., et al., *Polishing Porcelain Tile. Part 1: Wear Mechanism*. American Ceramic Society Bulletin, 2002. **81**: p. 50-54.
22. Orts, M.J., et al., *Comportamiento del gres porcelánico durante la operación de pulido*. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2001. **40**: p. 447-455.
23. Esposito, L., A. Tucci, and D. Naldi, *The reliability of polished porcelain stoneware tiles*. Journal of the European Ceramic Society, 2005. **25**: p. 1487-1498.
24. Bittencourt, E.L. and E. Benincá, *Aspectos Superficiais do Produto Grês Polido*. Cerâmica Industrial, 2002. **7**(4): p. 40-42.
25. Sousa, F.J.P., et al., *Kinematics of a single abrasive particle during the industrial polishing process of porcelain stoneware tiles*. Journal of the European Ceramic Society, 2007. **27**(10): p. 3183-3190.
26. Hutchings, I.M., et al., *Analysis and laboratory simulation of an industrial polishing process for porcelain ceramic tiles*. Journal of the European Ceramic Society, 2005. **25**(13): p. 3151-3156.
27. Sousa, F.J.P., et al., *Glossiness distribution over the surface of stoneware floor tiles due to the polishing process*. Journal of Materials Science, 2007. **42**(24): p. 10124-10132.
28. Ozturk, A. and M. Timucin, *Silicon carbide particle embedded magnesium oxychloride cement composite bricks for polishing of porcelain stoneware tiles*. Advances in Applied Ceramics, 2011. **110**(7): p. 400-408.

29. 10545-14, N.E.I., *Pavimentos e revestimentos cerâmicos- Parte 14: Determinação da resistência às manchas*. 2004.
30. 10545-3, N.E.I., *Pavimentos e revestimentos cerâmicos- Parte 3: Determinação da absorção de água, da porosidade aberta, da densidade relativa aparente e da massa volúmica global*. 2001.
31. http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Process-Environmental/Documents/HRE3313A_IG320-331.pdf. acessado a 22/07/2013.
32. Parra, B.S., et al., *Rugosidade Superficial de Revestimentos Cerâmicos*. Cerâmica Industrial, 2006. **11**(2): p. 15-18.
33. http://www.phynix.com/fileadmin/pdf/tr_series_e.pdf. acessado em 24/06/2013.
34. 10545-6, N.E.I., *Pavimentos e revestimentos cerâmicos- Parte 6: Determinação da resistência à abrasão profunda para ladrilhos não vidrados*. 2004.
35. 10545-7, N.E.I., *Pavimentos e revestimentos cerâmicos- Parte 7: Determinação da resistência à abrasão superficial para ladrilhos vidrados*. 2000.
36. Tenorio Cavalcante, P.M., et al., *Fatores Chaves na Resistência a Abrasão de Pisos de Grês Porcelanato*. Cerâmica Industrial, 2003. **8**(5/6): p. 21-26.
37. Duran, A.R., *Relação entre Porosidade Superficial do Vidrado e a Resistência à Abrasão Superficial de Cerâmicas Esmaltadas*. Cerâmica Industrial, 2005. **10**(3): p. 32-36.
38. Alves, H.J., et al., *Porosidade Susceptível ao Manchamento em Porcelanato Polido*. Cerâmica Industrial, 2009. **14**(1).
39. Alves, H.J., et al., *Dependence of surface porosity on the polishing depth of porcelain stoneware tiles*. Journal of the European Ceramic Society, 2011. **31**(5): p. 665-671.